WEG INDÚSTRIAS LTDA
CENTRO DE TREINAMENTO DE CLIENTES

MÓDULO 2
Variação de Velocidade

tr_CTC-239_P4

WEG – Transformando Energia em Soluções

Índice

1 MANUAL DE MOTORES ELÉTRICOS

1.1 HISTÓRICO

O ano de 1866 pode ser considerado, em termos práticos, como o ano de nascimento da máquina elétrica, pois foi nesta data que o cientista alemão Werner Siemens inventou o primeiro gerador de corrente contínua auto-induzido. Entretanto, deve-se mencionar que esta máquina elétrica, que revolucionou o mundo em poucos anos, foi o último estágio de um processo de estudos, pesquisas e invenções de muitos outros cientistas, durante quase três séculos.

Em 1600 o cientista inglês William Gilbert publicou, em Londres, a obra intitulada “De Magnete”, descrevendo a força de atração magnética. O fenômeno da eletricidade estática já havia sido observado pelo grego Tales, em 641 AC, ele verificou que ao atritar uma peça de âmbar com pano esta adquiria a propriedade de atrair corpos leves, como pêlos, penas, cinzas, etc.

A primeira máquina eletrostática foi construída em 1663, pelo alemão Otto Guericke, e aperfeiçoada em 1775 pelo suíço Martin Planta.

O físico dinamarquês Hans Christian Oersted, ao fazer experiências com correntes elétricas, verificou ao acaso, em 1820, que a agulha magnética de uma bússola era desviada de sua posição norte-sul quando esta passava perto de um condutor no qual circulava corrente elétrica. Esta observação permitiu a Oersted reconhecer a íntima relação entre magnetismo e eletricidade, dando assim o primeiro passo em direção ao desenvolvimento do motor elétrico.

O sapateiro inglês William Sturgeon - que, paralelamente à sua profissão, estudava eletricidade nas horas de folga - baseando-se na descoberta de Oersted constatou, em 1825, que um núcleo de ferro envolto por um fio condutor elétrico transformava-se em imã quando se aplicava uma corrente elétrica, observando também que a força do imã cessava tão logo a corrente fosse interrompida. Estava inventando o eletroímã, que seria de fundamental importância na construção de máquinas elétricas girantes.

Mas as experiências com o magnetismo e a eletricidade não cessaram. Em 1832, o cientista italiano S. Dal Negro construiu a primeira máquina de corrente alternada com movimento de vaivém. Já no ano de 1833 o inglês W. Ritchie inventou o comutador, construindo um pequeno motor elétrico onde o núcleo de ferro enrolado girava em torno de um imã permanente. Para dar uma rotação completa, a polaridade do eletroímã era alternada a cada meia volta através do comutador. A inversão da polaridade também foi demonstrada pelo mecânico parisiense H. Pixii ao construir um gerador com um imã em forma de ferradura que girava diante de duas bobinas fixas com um núcleo de ferro. A corrente alternada era transformada em corrente contínua pulsante através de um comutador.

Grande sucesso obteve o motor elétrico desenvolvido pelo arquiteto e professor de física Moritz Hermann Von Jacobi - que, em 1838, aplicou-o a uma lancha.

Somente em 1866 Siemens construiu um gerador sem a utilização de imã permanente, provando que a tensão necessária para o magnetismo podia ser retirada do próprio enrolamento do rotor, isto é, que a máquina podia auto-excitar-se. O primeiro dínamo de Werner Siemens possuía uma potência de aproximadamente 30 watts e uma rotação de 1200rpm. A máquina de Siemens não funcionava somente como gerador de eletricidade. Podia também operar como motor, desde que se aplicasse aos seus bornes uma corrente contínua.

Em 1879, a firma Siemens & Halske apresentou, na feira industrial de Berlim, a primeira locomotiva elétrica, com uma potência de 2kW.

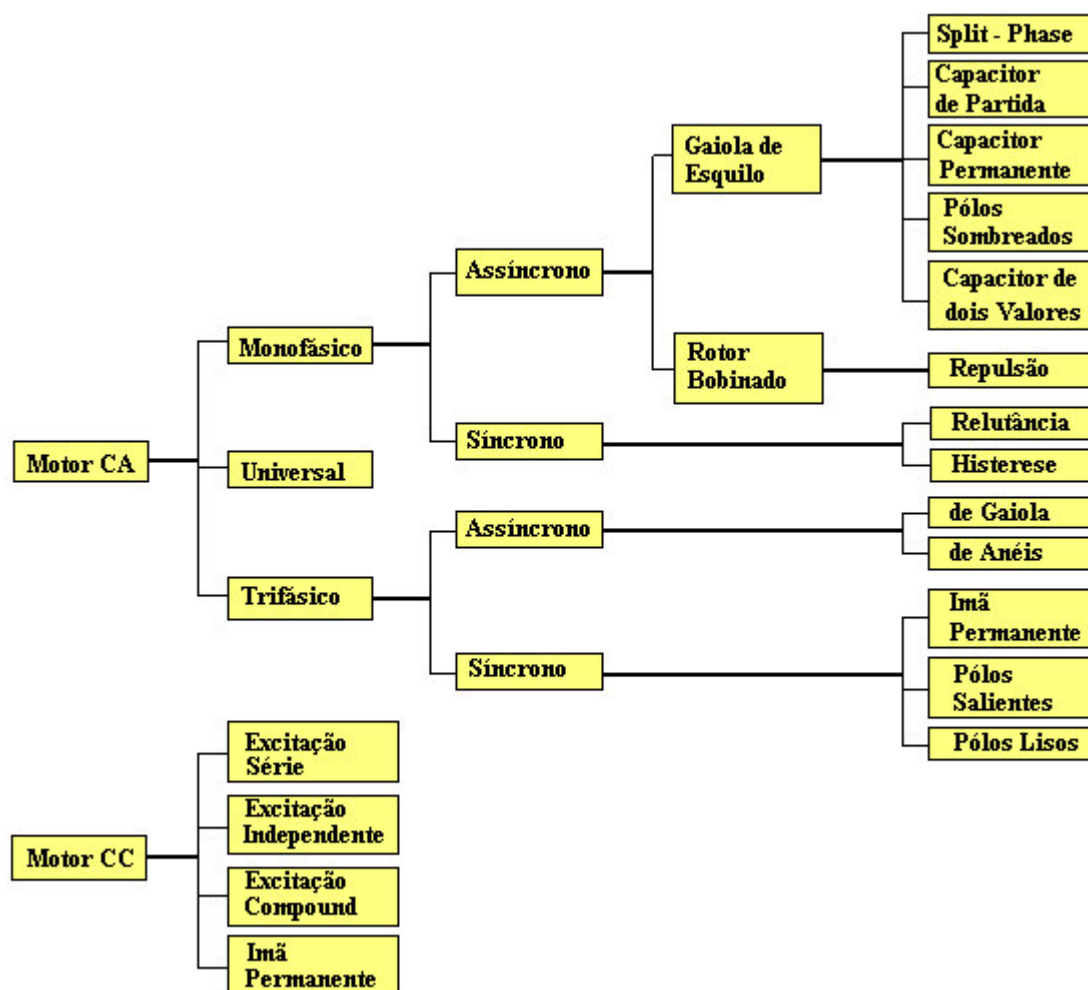
A nova máquina de corrente contínua apresentava vantagens em relação à máquina a vapor, à roda d'água e à força animal. Entretanto, o alto custo de fabricação e sua vulnerabilidade em serviço (por causa do comutador) marcaram-na de tal modo que muitos cientistas dirigiram suas atenções para o desenvolvimento de um motor elétrico mais barato, mais robusto e de menor custo de manutenção.

Entre os pesquisadores preocupados com esta idéia destacam-se o iugoslavo Nicola Tesla, o italiano Galileu Ferraris e o russo Michael Von Dolivo Dobrowolsky. Os esforços não se restringiram somente ao aperfeiçoamento do motor de corrente contínua, mas também se cogitou de sistemas de corrente alternada, cujas vantagens já eram conhecidas desde 1881.

Em 1885, o engenheiro eletricista Galileu Ferraris construiu um motor de corrente alternada de duas fases. Ferraris, apesar de ter inventado o motor de campo girante, concluiu erroneamente que motores construídos segundo este princípio poderiam, no máximo, obter um rendimento de 50% em relação à potência consumida. E Tesla apresentou, em 1887, um pequeno protótipo de motor de indução bifásico com rotor em curto-circuito. Também este motor apresentou rendimento insatisfatório, mas impressionou de tal modo a firma norte-americana Westinghouse, que esta lhe pagou um milhão de dólares pelo privilégio da patente, além de se comprometer ao pagamento de um dólar para cada HP que viesse a produzir no futuro. O baixo rendimento deste motor inviabilizou economicamente sua produção e três anos mais tarde as pesquisas foram abandonadas.

Foi o engenheiro eletricista Dobrowolsky, da firma AEG, de Berlim, que, persistindo na pesquisa do motor de corrente alternada entrou, em 1889, com o pedido de patente de um motor trifásico com rotor de gaiola. O motor apresentado tinha uma potência de 80 watts, um rendimento aproximado de 80% em relação à potência consumida e um excelente conjugado de partida. As vantagens do motor com rotor de gaiola em relação ao de corrente contínua eram marcantes: construção mais simples, silencioso, menor manutenção e alta segurança em operação. Dobrowolsky desenvolveu, em 1891, a primeira fabricação em série de motores assíncronos, nas potências de 0,4 a 7,5kW.

1.2 NOÇÕES FUNDAMENTAIS

1.2.1 *MOTORES ELÉTRICOS*

O Universo Tecnológico em Motores Elétricos

1.2.1.1 *MOTOR SÍNCRONO*

Os motores síncronos são motores de velocidade constante e proporcional com a frequência da rede. Os pólos do rotor seguem o campo girante imposto ao estator pela rede de alimentação trifásica. Assim, a velocidade do motor é a mesma do campo girante.

Basicamente, o motor síncrono é composto de um enrolamento estatórico trifásico, que produz o que se designa de campo girante, e de um rotor bobinado (de pólos salientes ou de pólos lisos) que é excitado por uma tensão CC. Esta tensão CC de excitação gera um campo estacionário no rotor que interagindo com o campo girante produzido pelo enrolamento estatórico, produz torque no eixo do motor com uma rotação igual ao próprio campo girante.

Figura 1.1 - Motor síncrono

O maior conjugado que o motor pode fornecer está limitado pela máxima potência que pode ser cedida antes da perda de sincronismo, isto é, quando a velocidade do rotor se torna diferente da velocidade do campo girante, ocasionando a parada do motor (tombamento). A excitação determina também as porcentagens de potência ativa e reativa que o motor retira da rede, para cada potência mecânica solicitada pela carga.

Este tipo de motor tem a sua aplicação restrita a acionamentos especiais, que requerem velocidades invariáveis em função da carga (até o limite máximo de torque do motor). A sua utilização com conversores de frequência pode ser recomendada quando se necessita uma variação de velocidade aliada a uma precisão de velocidade mais apurada.

A rotação do eixo do motor (rotação síncrona) é expressa por:

$$n_S = \frac{120 \times f}{2p}$$

Onde: n_S = Rotação síncrona (rpm);
f = Frequência (Hz);
p = Número de pares de pólos.

1.2.1.2 *MOTOR ASSÍNCRONO*

Os motores assíncronos ou de indução, por serem robustos e mais baratos, são os motores mais largamente empregados na indústria. Nestes motores, o campo girante tem a velocidade síncrona, como nas máquinas síncronas.

Teoricamente, para o motor girando em vazio e sem perdas, o rotor teria também a velocidade síncrona. Entretanto ao ser aplicado o conjugado externo ao motor, o seu rotor diminuirá a velocidade na justa proporção necessária para que a corrente induzida pela diferença de rotação entre o campo girante (síncrono) e o rotor, passe a produzir um conjugado eletromagnético igual e oposto ao conjugado externamente aplicado.

Este tipo de máquina possui várias características próprias, que são definidas e demonstradas em uma larga gama de obras dedicadas exclusivamente a este assunto. Nesta apostila veremos os princípios e equações básicas necessárias para o desenvolvimento do tema voltado à aplicação de conversores de frequência para a variação de velocidade.

A rotação do eixo do motor é expressa por:

$$n_S = \frac{120 \times f}{2p} \times (1 - s)$$

Onde: n_S = Rotação síncrona (rpm);
f = Frequência (Hz);
p = Número de pares de pólos;
s = Escorregamento.

Basicamente os motores assíncronos se subdividem em dois tipos principais, os quais são:

1.2.1.2.1 *ROTOR DE GAIOLA*

Os motores deste tipo também são comumente chamados de motores de GAIOLA DE ESQUILO, pois as barras rotóricas tem a característica de serem curto-circuitadas, assemelhando-se a tal, como mostrado na figura a seguir :

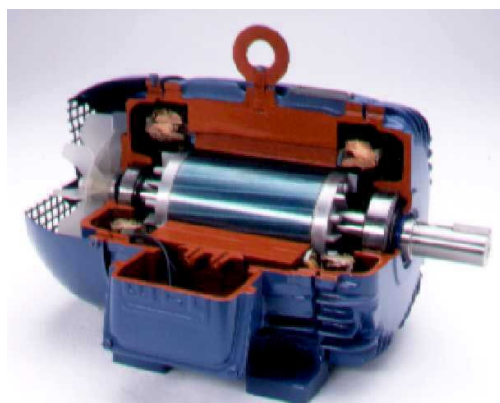



Figura 1.2 – Motor assíncrono de rotor de gaiola

1.2.1.2.2 *ROTOR BOBINADO*

O motor de anéis possui a mesma característica construtiva do motor de indução com relação ao estator, mas o seu rotor é bobinado com um enrolamento trifásico, acessível através de três anéis com escovas coletoras no eixo.

Graças a característica do ajuste da curva de conjugado x rotação em função do aumento da resistência rotórica pela inclusão de resistores externos, são estes motores largamente utilizados no acionamento de sistemas de elevada inércia e nos casos em que o conjugado resistente em baixas rotações seja alto comparativamente ao conjugado nominal.

Por outro lado, para acionamentos com baixa inércia, estes motores podem apresentar correntes de aceleração reduzidas.

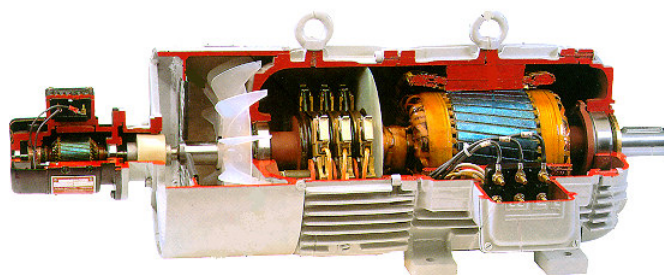



Figura 1.3 – Motor assíncrono de rotor de anéis

1.2.1.3 *MOTOR CC*

As máquinas de corrente contínua, em função do seu princípio de funcionamento, permitem variar a velocidade de zero até a velocidade nominal aliada com a possibilidade de se ter conjugado constante. Esta característica é de fundamental importância, pois dessa forma torna-se possível fazer o acionamento em várias aplicações que exigem ampla faixa de variação de velocidade com uma ótima regulação e precisão de velocidade.

Sendo um sistema específico e direcionado a aplicações dedicadas, os motores de corrente contínua são dimensionados de forma a ter as suas características definidas especialmente ao acionamento, vindo com isto a acarretar em uma elevação dos custos de produção e ser considerado como uma máquina diferenciada, onde na maior parte das situações é produzida sob encomenda.

O sistema de acionamento por corrente contínua é ainda um sistema largamente utilizado, pois em muitas aplicações é necessário que se tenha uma ótima precisão de velocidade (até 0,01%), principalmente nas aplicações de sincronismo entre vários motores.

Para que isto possa ocorrer, a maioria dos acionamentos CC são realimentados, isto é, possuem no motor CC um tacogerador acoplado ao seu eixo que fornece informação da velocidade do motor com o intuito de melhorar a sua regulação de velocidade.

Outra característica destes motores é que possuem em sua maioria ventilação independente e classe de isolamento melhorada (classe F), para que permitam a sua operação em velocidades reduzidas sem problemas de sobreaquecimento e redução de sua vida útil. A rotação do motor de corrente contínua é expressa por:

$$n = \frac{U_A - (R_A \times I_A)}{k \times \Phi_m}$$

Onde:
- U_A = Tensão de armadura (Vcc);
- I_A = Corrente de armadura (Acc);
- R_A = Resistência de armadura;
- k = Constante;
- Φ_m = Fluxo magnetizante;
- n = Rotação (rpm).

Os motores de corrente contínua permitem também a operação com rotações além da rotação nominal, utilizando-se o que se caracteriza por "ENFRAQUECIMENTO DE CAMPO", que é o aumento da rotação através da redução do fluxo magnetizante e conseqüente redução de torque, conforme descrito na região II da figura a seguir:

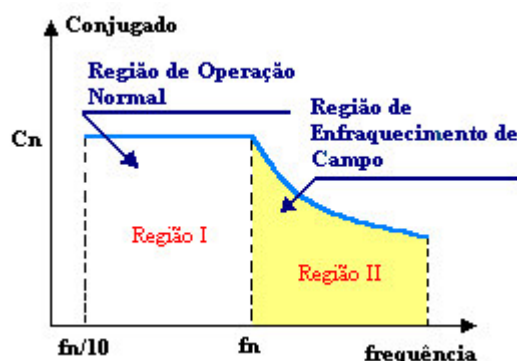



Figura 1.4 - Característica do conjugado x rotação do motor CC

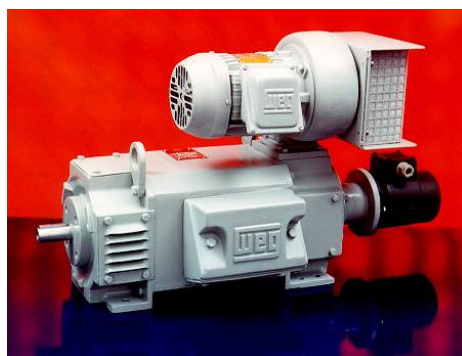



Figura 1.5 – Motor Corrente Contínua

1.2.2 *CONCEITOS BÁSICOS*

1.2.2.1 *CONJUGADO*

O conjugado, também chamado de torque ou binário, é a medida do esforço necessário para girar o eixo. Para medir o esforço necessário para fazer girar o eixo não basta definir a força empregada, é preciso também dizer a que distância do eixo a força é aplicada. O esforço é medido pelo conjugado, que é o produto da força pela distância.

$$C = F \times \ell \qquad (1.2.2.1.1)$$

A unidade utilizada para o conjugado no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Newton.metro (N.m).

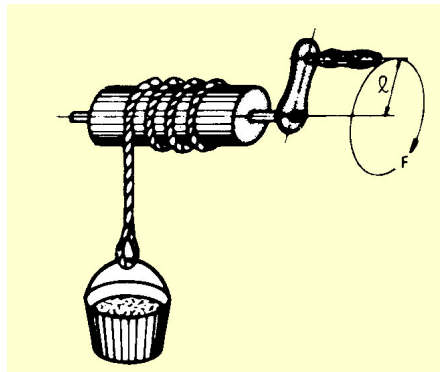



Figura 1.6

Exemplo: Deseja-se levantar um peso por um processo semelhante ao usado em poços, onde, a força F que é preciso aplicar à manivela, depende do comprimento (ℓ) da manivela. Quanto maior for a manivela, menor será a força necessária para suspender o balde. Se o balde pesa 20N e o diâmetro do tambor é 0,20m, a corda transmitirá uma força de 20N na superfície do tambor, isto é, a 0,10m do centro do eixo. Para contrabalançar esta força , precisam de 10N na manivela, se o comprimento ℓ for de 0,20m. se ℓ for o dobro, isto é, 0,40m, a força F será a metade, ou seja 5N. Neste caso, o conjugado será:

$$C = F \times \ell = 20N \times 0{,}10m = 10N \times 0{,}20m = 5N \times 0{,}40m$$

$$C = 2{,}0N.m$$

1.2.2.2 *ENERGIA E POTÊNCIA MECÂNICA*

A potência mede a rapidez com que a energia é aplicada ou consumida. Como no exemplo anterior, a energia gasta ou o trabalho realizado para trazer o balde do fundo até a superfície é sempre a mesma, porém a potência exprime a rapidez com que esta energia é aplicável para erguer o balde até a boca, ou seja, a potência é a energia ou trabalho total realizado dividido pelo tempo total para realizá-lo. A unidade utilizada para a potência mecânica no SI é o Watt (W), porém a unidade mais usual para a potência mecânica é o c.v.(cavalo-vapor), equivalente a 736W.

$$W_{mec} = F \times d \qquad \text{(N.m)}$$

$$P_{mec} = \frac{F \times d}{t} \qquad \text{(W)}$$

$$P_{mec} = \frac{F \times d}{736 \times t} \qquad \text{(cv)}$$

lembrando que, 1N.m = 1J = W.Δt. Para movimentos circulares.

$$C = F \times r \qquad \text{(N.m)}$$

$$v = \frac{\pi . d . n}{60} \qquad \text{(m/s)}$$

$$P_{mec} = \frac{F \times d}{736} \qquad \text{(cv)}$$

Onde: C = conjugado em N.m;
F = força em N;
ℓ = braço de alavanca em m;
r = raio da polia em m;
v = velocidade angular em m/s;
d = diâmetro da peça em m;
n = velocidade em rpm.

1.2.2.3 *ENERGIA E POTÊNCIA ELÉTRICA*

Embora a energia seja uma só, ela pode ser obtida de formas diferentes. Se ligar uma resistência a uma rede elétrica com tensão, passará uma corrente elétrica que irá aquecer a resistência. A resistência absorve energia e a transforma em calor, que também é uma forma de energia. Um motor elétrico absorve energia elétrica da rede e a transforma em energia mecânica disponível na ponta do eixo.

1.2.2.3.1 *CIRCUITOS DE CORRENTE CONTÍNUA*

A "potência elétrica", em circuitos de corrente contínua, pode ser obtida através da relação da tensão (U), corrente (I) e resistência (R), envolvidas no circuito, ou seja:

$$P = U \times I \qquad P = \frac{U^2}{R} \qquad P = R \times I^2 \qquad \text{(W)}$$

Onde: U = tensão em volt;
I = corrente em ampères;
R = resistência em ohm;
P = potência média em watt.

1.2.2.3.2 *CIRCUITOS DE CORRENTE ALTERNADA*

- ***Resistência***

No caso de "resistências", quanto maior a tensão da rede, maior será a corrente e mais depressa a resistência será se aquecer. Isto quer dizer que a potência elétrica será maior. A

potência elétrica absorvida da rede, no caso da resistência, é calculada multiplicando-se a tensão da rede pela corrente, se a resistência (carga), for monofásica.

$$P = U \times I \qquad \text{(W)}$$

No sistema trifásico a potência em cada fase da carga será $P_f = U_f \times I_f$, como se fosse um sistema monofásico independente. A potência total será a soma das potências das três fases, ou seja:

$$P = 3 \times P_f = 3 \times U_f \times I_f$$

Lembrando que o sistema trifásico é ligado em estrela ou triângulo, tem-se as seguintes relações:

Ligação estrela: $U = \sqrt{3} \times U_f$ e $I = I_f$

Ligação triângulo: $U = U_f$ e $I = \sqrt{3} \times I_f$

Assim, a potência total, para ambas as ligações, será:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \qquad \text{(W)}$$

Obs.: esta expressão vale para a carga formada por resistências, onde não há defasagem da corrente em relação a tensão.

- ***Cargas Reativas***

Para as "cargas reativas", ou seja, onde existe defasagem, como é o caso dos motores de indução, esta defasagem tem que ser levada em conta e a expressão fica:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \qquad \text{(W)}$$

A unidade de medida usual para potência elétrica é o watt (W), correspondente a 1 volt x 1 ampère, ou seu múltiplo, o quilowatt = 1000 watts. Esta unidade também é utilizada para a medida de potência mecânica.

A unidade de medida usual para energia elétrica é o quilowatt-hora (kWh) correspondente à energia fornecida por uma potência de um quilowatt funcionando durante uma hora – é a unidade que aparece, para cobrança, nas contas de luz.

1.2.2.4 *VELOCIDADE NOMINAL*

É a velocidade (rpm) do motor funcionando à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. A velocidade nominal depende do escorregamento e da velocidade síncrona.

$$n = n_S \times \left(1 - \frac{s\,\%}{100}\right) \qquad \text{(rpm)}$$

A velocidade síncrona n_S é função do número de pólos e da frequência de alimentação:

$$n_S = \frac{120 \times f}{2p} \qquad \text{(rpm)}$$

1.2.2.4.1 *ROTAÇÃO NOMINAL DO MOTOR CC*

É a rotação obtida em carga nominal, sob tensão nominal na armadura e campo, na temperatura de funcionamento. A variação da rotação permitida por norma NBR está contida na tabela abaixo.

Excitação	*KW/rpm.1000*	*Tolerância*
Independente ou em Derivação	< 0,67	± 15 %
	≥ 0,67 < 2,5	± 10 %
	≥ 2,5 < 10	± 7,5 %
	≥ 10	± 5 %
Série	< 0,67	± 20 %
	≥ 0,67 < 2,5	± 15 %
	≥ 2,5 < 10	± 10 %
	≥ 10	± 7,5 %
Excitação Composta	**Tolerâncias compreendidas entre as fixadas para os motores com excitação independente e as fixadas para motores com excitação série, conforme acordo entre fabricante e comprador**	

Tabela 1.2.2.4.1 – Tolerâncias de rotações

1.2.2.5 *CORRENTE NOMINAL*

É a corrente que o motor absorve da rede quando funciona à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. O valor da corrente nominal depende do rendimento (η) e do fator de potência ($\cos\varphi$) do motor:

$$I = \frac{P(kW) \times 1000}{\sqrt{3} \times U \times \eta \times \cos\varphi} = \frac{736 \times P(c.v.)}{\sqrt{3} \times U \times \eta \times \cos\varphi} \qquad \text{(A)}$$

Os valores típicos de corrente, rendimento e fator de potência dos motores WEG de II, IV, VI e VIII pólos, são mostrados nos catálogos.

1.2.2.6 POTÊNCIA APARENTE, ATIVA E REATIVA

Potência aparente (S):

É o resultado da multiplicação da tensão pela corrente ($S = U \times I$ para sistemas monofásicos e $S = \sqrt{3} \times U \times I$, para sistemas trifásicos). Corresponde a potência real ou "potência ativa" que existiria se não houvesse defasagem da corrente, ou seja, se a carga fosse formada por resistência. Então,

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \quad \text{(va)} \qquad (1.2.2.6.1)$$

Para as cargas resistivas, cosφ = 1 e a potência ativa se confunde com a potência aparente. A unidade de medidas para potência aparente é o volt-ampère (v.a.) ou seu múltiplo, o quilovolt-ampère (kva.).

Potência ativa (P):

É a parcela da potência aparente que realiza trabalho, ou seja, que é transformada em energia.

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \quad \text{(W)} \qquad (1.2.2.6.2)$$

ou, $$P = S \times \cos\varphi \quad \text{(W)} \qquad (1.2.2.6.3)$$

Potência reativa (Q):

É a parcela da potência aparente que "não" realiza trabalho. Apenas é transferida e armazenada nos elementos passivos (capacitores e indutores) do circuito.

$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \operatorname{sen}\varphi \quad \text{(v.a.r.)} \quad (1.2.2.6.4)$$

$$Q = S \times \operatorname{sen}\varphi \quad \text{(v.a.r.)} \quad (1.2.2.6.5)$$

1.2.2.7 POTÊNCIA EQUIVALENTE

Evidentemente um motor elétrico deverá suprir à máquina acionada a potência necessária, sendo recomendável que haja uma margem de folga, pois pequenas sobrecargas poderão ocorrer; ou ainda, dependendo do regime de serviço, o motor pode eventualmente suprir mais ou menos potência. Apesar das inúmeras formas normalizadas de descrição das condições de funcionamento de um motor, é freqüentemente necessário na prática, avaliar a solicitação imposta ao motor por um regime mais complexo que aqueles descritos nas normas. Uma forma usual é calcular a potência equivalente pela fórmula:

$$(P_m)^2 = \frac{1}{T}\int_0^T P(t).dt \qquad (1.2.2.7.1)$$

Onde: P_m = potência equivalente solicitada ao motor;
P(t) = potência, variável pelo tempo, solicitada ao motor;
T = duração total do ciclo (período).

O método é baseado na hipótese de que a carga efetivamente aplicada ao motor acarretará a mesma solicitação térmica que uma carga fictícia, equivalente, que solicita continuamente a potência P_m. Baseia-se também no fato de ser assumida uma variação das perdas com o quadrado da carga, e que a elevação de temperatura é diretamente proporcional às perdas. Isto é verdadeiro para motores que giram continuamente, mas são solicitados intermitentemente. Assim:

$$P_m = \sqrt{\frac{P_1^2.t_1 + P_2^2.t_2 + P_3^2.t_3 + P_4^2.t_4 + P_5^2.t_5 + P_6^2.t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}} \qquad (1.2.2.7.2)$$

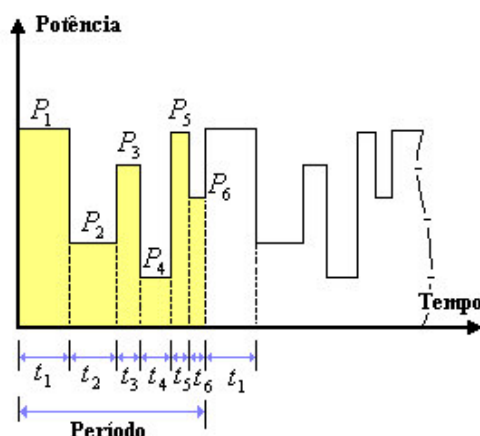



Figura 1.7 – Funcionamento contínuo com solicitações intermitentes

No caso do motor ficar em repouso entre os tempos de carga, a refrigeração deste será prejudicada. Assim, para os motores onde a ventilação está vinculada ao funcionamento do motor (por exemplo, motores totalmente fechados com ventilador externo montados no próprio eixo do motor) a potência equivalente é calculada pela fórmula:

$$(P_m)^2 = \frac{\sum \left(P_i^2.t_i\right)}{\sum \left(t_i + \frac{1}{3} t_r\right)} \qquad (1.2.2.7.3)$$

Onde: t_i = tempo em carga;
t_r = tempo em repouso;
P_i = cargas correspondentes.

$$P_m = \sqrt{\frac{P_1^2.t_1 + P_3^2.t_3 + P_5^2.t_5 + P_6^2.t_6}{t_1 + t_3 + t_5 + t_6 + \frac{1}{3}(t_2 + t_4 + t_7)}} \qquad (1.2.2.7.4)$$

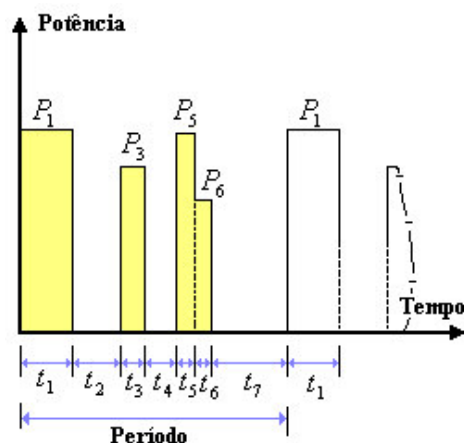



Figura 1.8 – Funcionamento com carga variável e com repouso entre os tempos de carga

1.2.2.8 *TRIÂNGULO DE POTÊNCIA*

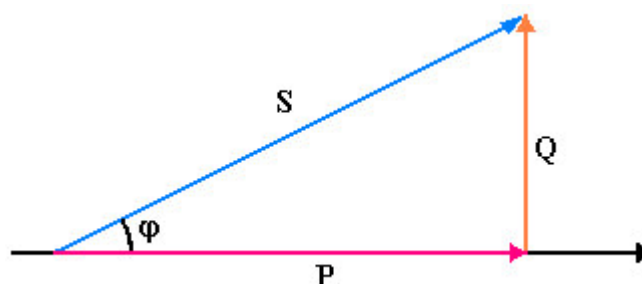



Figura 1.9 – Triângulo de potências

Onde: S = potência aparente;
P = potência ativa;
Q = potência reativa.

1.2.2.9 *FATOR DE POTÊNCIA*

O fator de potência, indicado por cosφ, onde φ é o ângulo de defasagem da tensão em relação à corrente; é a relação entre a potência real (ativa) P e a potência aparente S.

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P(W)}{\sqrt{3} \times U \times I} \qquad (1.2.2.9.1)$$

Assim,

- Carga Resistiva: cosφ =1;
- Carga Indutiva: cosφ atrasado;
- Carga Capacitiva: cosφ adiantado.

Os termos, atrasado e adiantado, referem-se à fase da corrente em relação à fase da tensão.

1.2.2.10 *RENDIMENTO*

O motor elétrico absorve energia elétrica da linha e a transforma em energia mecânica disponível no eixo. O rendimento define a eficiência com que é feita esta transformação. Chamado potência útil (Pu), a potência mecânica disponível no eixo e, potência absorvida (Pa), a potência elétrica que o motor retira da rede, o rendimento será a relação entre as duas, ou seja:

$$\eta\% = \frac{Pu(W)}{Pa(W)} \times 100 = \frac{P(W)}{\sqrt{3}.U.I.\cos\varphi} \times 100 = \frac{736.P(c.v)}{\sqrt{3}.U.I.\cos\varphi} \times 100 \qquad (1.2.2.10.1)$$

1.2.2.10.1 *IMPORTÂNCIA DO RENDIMENTO*

É importante que o motor tenha um rendimento alto, por dois motivos:

- Primeiro, porque, um rendimento alto significa perdas baixas e, portanto, um menor aquecimento do motor;
- Segundo, porque, quanto maior o rendimento, menor a potência absorvida da linha, e portanto, menor o custo da energia elétrica paga nas contas mensais. O rendimento varia com a carga do motor. Os catálogos dos motores WEG, indicam os valores típicos do rendimento em função da carga. Estes valores são representados genericamente na figura 1.10.

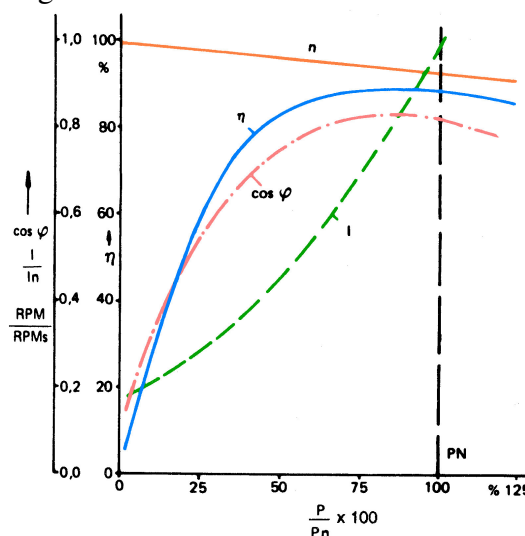



Figura 1.10 – Curvas características típicas de motores de indução trifásicos

Onde: I – corrente;
I_n – corrente nominal;
P – potência;
P_n – potência nominal;
rpm – rotação;
rpms – rotação síncrona;
η – rendimento;
cos φ – fator de potência.

1.2.2.11 *RELAÇÃO ENTRE UNIDADES DE POTÊNCIA*

$$P(kW) = 0{,}736.P(c.v) \qquad P(c.v) = 1{,}359.P(kW)$$

1.2.2.12 *RELAÇÃO ENTRE CONJUGADO E POTÊNCIA*

Quando a energia mecânica é aplicada sob a forma de movimento rotativo, a potência desenvolvida depende do conjugado C e da velocidade de rotação n. As relações são:

$$P(c.v) = \frac{C(kgfm) \times n(rpm)}{716} = \frac{C(Nm) \times n(rpm)}{7024}$$

$$P(kW) = \frac{C(kgfm) \times n(rpm)}{974} = \frac{C(Nm) \times n(rpm)}{9555}$$

Inversamente:

$$C(kgfm) = \frac{716 \times P(c.v)}{n(rpm)} = \frac{974 \times P(kW)}{n(rpm)}$$

$$C(Nm) = \frac{7024 \times P(c.v)}{n(rpm)} = \frac{9555 \times P(kW)}{n(rpm)}$$

1.2.2.13 *SISTEMAS DE CORRENTE ALTERNADA MONOFÁSICA*

1.2.2.13.1 *GENERALIDADES*

A corrente alternada caracteriza-se pelo fato de que a tensão (voltagem), em vez de permanecer fixa, como entre os pólos de uma bateria, varia com o tempo, mudando de sentido alternadamente, donde o seu nome. No sistema monofásico uma tensão alternada U (volt) é gerada e aplicada entre dois fios, aos quais se liga a carga, que absorve uma corrente I (ampère).

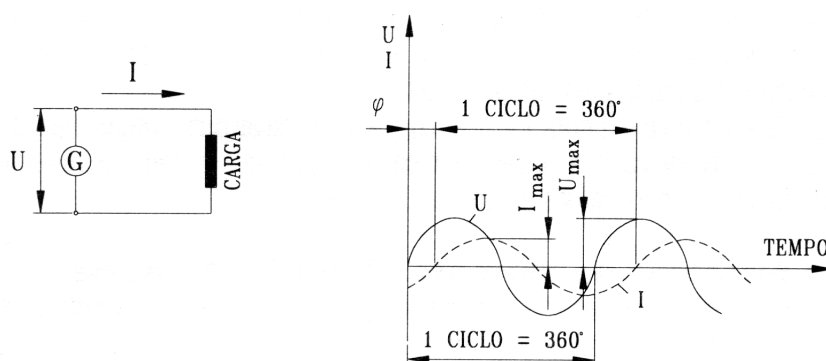



Figura 1.11

Representando em um gráfico os valores de U e I, a cada instante, vamos obter a figura 1.11, estão também indicadas algumas grandezas que serão definidas em seguida. Note que as ondas de tensão e de corrente não estão em fase, isto é, não passam pelo valor zero ao mesmo tempo, embora tenha a mesma frequência, isto acontece para muitos tipos de carga, por exemplo, enrolamentos de motores (cargas reativas).

- **Frequência:** É o número de vezes por segundo que a tensão muda de sentido e volta a condição inicial. É expressa em ciclos por segundo ou hertz, simbolizada por Hz;
- **Tensão Máxima ($U_{máx}$):** É o valor de pico da tensão, ou seja, o maior valor instantâneo atingido pela tensão durante um ciclo (este valor é atingido duas vezes por ciclo, uma vez positivo e uma vez negativo).
- **Corrente Máxima ($I_{máx}$):** É o valor de pico da corrente;
- **Valor eficaz de tensão e corrente (U e I):** É o valor da tensão e corrente contínuas que desenvolvem potência correspondente àquela desenvolvida pela corrente alternada. Pode-se demonstrar que o valor eficaz vale:

$$U = \frac{U_{máx}}{\sqrt{2}} \qquad \text{e} \qquad I = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}}$$

Exemplo: Quando liga-se uma resistência a um circuito de corrente alternada (cosφ = 1) com $U_{máx}$= 311 volts e $I_{máx}$= 14,14 ampères, a potência desenvolvida será:

$$P = U.I.\cos\varphi = \frac{1}{2}.U_{máx}.I_{máx}.\cos\varphi$$

$$P = 2200 \text{ watts}$$

Obs.: Na linguagem normal quando se fala em tensão e corrente, por exemplo, 220 volts ou 10 ampères, sem especificar mais nada, refere-se a valores eficazes da tensão ou da corrente, que são empregados na prática.

- **Defasagem (φ):** É o atraso da onda da corrente em relação a onda da tensão. Em vez de ser medido em tempo (segundos), este atraso é geralmente medido em ângulo

(grau) correspondente à fração de um ciclo completo, considerando 1 ciclo = 360°. Mas comumente a defasagem é expressa pelo coseno do ângulo.

1.2.2.13.2 *LIGAÇÕES EM SÉRIE E PARALELO*

(a) (b)

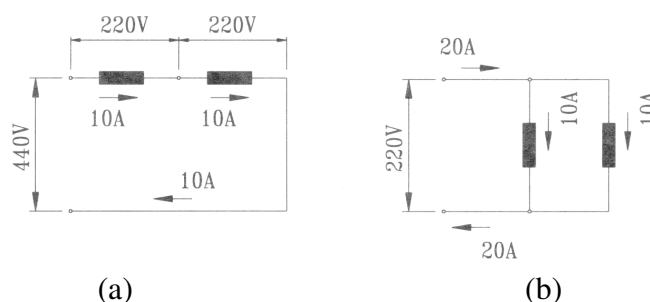



Figura 1.12 – (a) ligação em série, (b) ligação em paralelo

Se ligar duas cargas iguais a um sistema monofásico, esta ligação pode ser feita de dois modos:

- Ligação em série (figura 1.12 – (a)), em que duas cargas são atravessadas pela corrente total do circuito. Neste caso, a tensão em cada carga será a metade da tensão do circuito para cargas iguais;
- Ligação em paralelo (figura 1.12 – (b)), em que é aplicada às duas cargas a tensão do circuito. Neste caso, a corrente em cada carga será a metade da corrente total do circuito para cargas iguais.

1.2.3 *SISTEMAS DE CORRENTE ALTERNADA TRIFÁSICA*

O sistema trifásico é formado pela associação de três sistemas monofásicos de tensões U_1, U_2 e U_3 tais que a defasagem entre elas seja de 120°, ou seja, os "atrasos" de U_2 em relação a U_1, de U_3 em relação a U_2 e de U_1 em relação a U_3 sejam iguais a 120° (considerando um ciclo completo = 360°). O sistema é equilibrado, isto é, as três tensões têm o mesmo valor eficaz $U_1 = U_2 = U_3$ conforme figura 1.13:

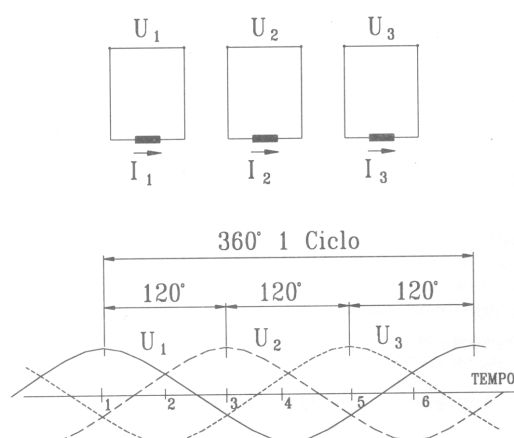



Figura 1.13

Ligando entre si os três sistemas monofásicos e eliminando os fios desnecessários, tem-se um sistema trifásico: três tensões U_1, U_2 e U_3 equilibradas, defasadas entre si de 120° e aplicadas entre os três fios do sistema. A ligação pode ser feita de duas maneiras, representadas nos esquemas seguintes. Nestes esquemas costuma-se representar as tensões com setas inclinadas ou valores girantes, mantendo entre si o ângulo correspondente à defasagem (120°).

1.2.3.1 *LIGAÇÃO TRIÂNGULO*

Ligando-se os três sistemas monofásicos entre si, como indica a figura abaixo, pode-se eliminar três fios, deixando apenas um em cada ponto de ligação, e o sistema trifásico ficará reduzido a três fios L_1, L_2 e L_3.

Tensão de linha (U): É a tensão nominal do sistema trifásico aplicada entre dois quaisquer dos três fios L_1, L_2 e L_3.

Corrente de linha (I_L): É a corrente em qualquer um dos três fios L_1, L_2, e L_3.

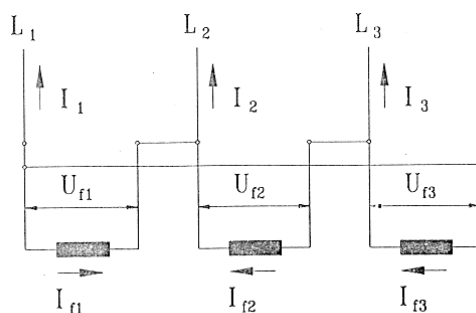



Figura 1.14 – ligação triângulo.

Tensão e corrente de fase (U_1 e I_1): É a tensão e corrente de cada um dos três sistemas monofásicos considerados.

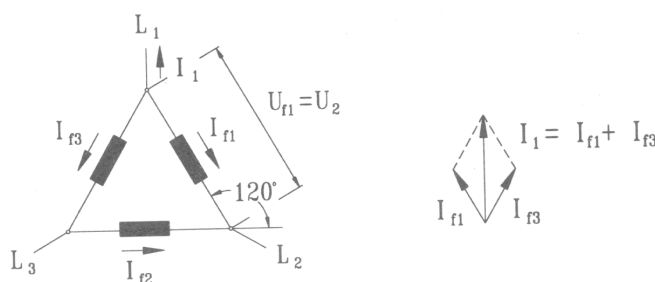



Figura 1.15 – ligação triângulo.

Examinando o esquema da figura, vê-se que:

$$U_1 = U_f$$

$$I_1 = \sqrt{3}.I_f = 1{,}732.I_f$$

Exemplo: Tem-se um sistema equilibrado de tensão nominal 220 volts. A corrente de linha medida é 10 ampères. Ligando a este sistema uma carga trifásica composta de três cargas iguais em triângulos, qual a tensão e a corrente em cada uma das cargas?

Tem-se $U_1 = U_f = 220$ volts em cada uma das cargas.

Se $I_1 = 1{,}732.I_f$, tem-se $I_f = 0{,}577 I_1 = 0{,}577 \text{ x } 10 = 5{,}77$ ampères em cada uma das cargas.

1.2.3.2 *LIGAÇÃO ESTRELA*

Ligando um dos fios de cada sistema monofásico a um ponto comum aos três, os três fios restantes formam um sistema trifásico em estrela. Às vezes, o sistema trifásico em estrela é "a quatro fios", ou "com neutro". O quarto fio é ligado ao ponto comum às três fases. A tensão de linha ou tensão nominal do sistema trifásico e a corrente de linha, são definidas do mesmo modo que na ligação triângulo.

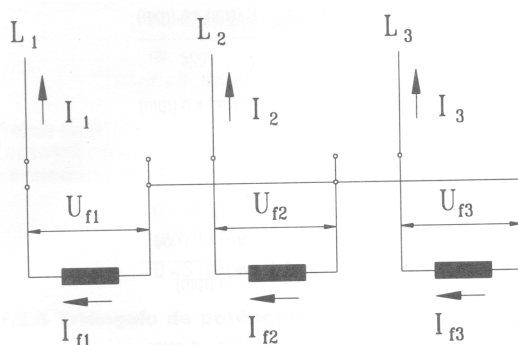



Figura 1.16 – Ligação estrela

Quando liga-se uma carga trifásica em estrela, e a potência das cargas em cada fase for igual, não há necessidade de se ligar o ponto central (comum) ao neutro, pois não irá circular corrente alguma por este ponto, neste caso tem-se um sistema equilibrado.

Caso as potências forem diferentes deve-se ligar o ponto central ao neutro, pois do contrário ficariam tensões diferentes em cima de cada carga e teríamos um sistema desequilibrado.

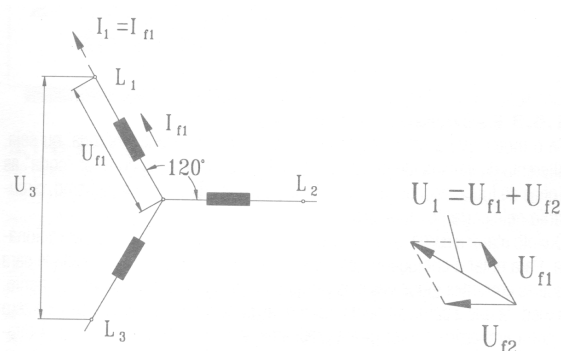



Figura 1.17 – Ligação estrela

Examinando o esquema da figura acima vê-se que:

$$I_1 = I_f$$

$$U_1 = \sqrt{3}.U_f = 1{,}732.U_f$$

Exemplo: Tem-se uma carga trifásica composta de três cargas iguais; cada carga é feita para ser ligada a uma tensão de 220 volts, absorvendo 5,77 ampères. Qual a tensão nominal do sistema trifásico que alimenta esta carga em suas condições normais (220 volts e 5,77 ampères)? Qual a corrente de linha?

Tem-se U_f = 220 volts (normal de cada carga);
U_l = 1,732 x 220 = 380 volts
$I_l = I_f$ = 5,77 ampères

1.2.4 *MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO*

1.2.4.1 *PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO*

Quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético dirigido conforme o eixo da bobina e de valor proporcional à corrente.

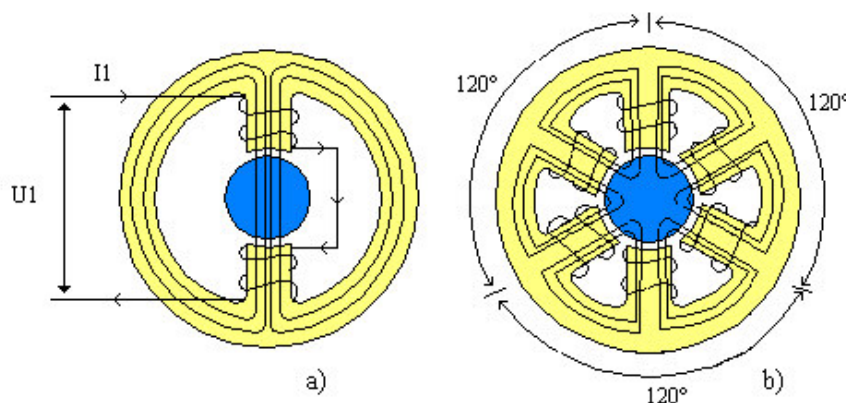



Figura 1.18

- Na figura (a) é indicado um "enrolamento monofásico" atravessado por uma corrente I, e o campo H é criado por ela; o enrolamento é constituído de um par de pólos (um pólo "norte" e um pólo "sul"), cujos efeitos se somam para estabelecer o campo H. O fluxo magnético atravessa o rotor entre os dois pólos e se fecha através do núcleo do estator. Se a corrente I é alternada, o campo H também é, e o seu valor a cada instante será representado pelo mesmo gráfico da figura 1.11, inclusive invertendo o sentido a cada ciclo. O campo H é "pulsante" pois, sua intensidade "varia" proporcionalmente à corrente, sempre na "mesma" direção norte-sul.

- Na figura (b) é indicado um "enrolamento trifásico", que é transformado por três monofásicos espaçados entre si de 120°. Se este enrolamento for alimentado por um sistema trifásico, as correntes I_1, I_2 e I_3 criarão, do mesmo modo, os seus próprios campos magnéticos H_1, H_2 e H_3. Estes campos são espaçados entre si de 120° . Além disso, como são proporcionais às respectivas correntes, serão defasados no tempo, também de 120° entre si e podem ser representados por um gráfico igual ao da figura 1.13. O campo total H resultante, a cada instante, será igual à soma gráfica dos três campos H_1, H_2 e H_3 naquele instante.

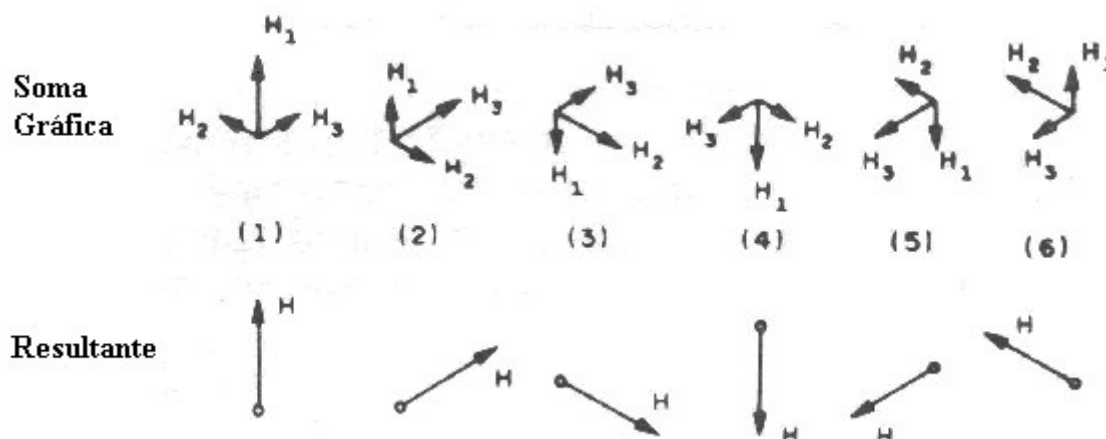



Figura 1.19 – Soma gráfica dos campos para seis instantes sucessivos

No instante (1), a figura 1.13 mostra que o campo H_1 é máximo e os campos H_2 e H_3 são negativos e de mesmo valor, iguais a 0,5. Os três campos são representados na figura 1.19 (1), parte superior, levando em conta que o campo negativo é representado por uma seta de sentido oposto ao que seria normal; o campo resultante (soma gráfica) é mostrado na parte inferior da figura 1.19, tendo a mesma direção do enrolamento da fase 1. Repetindo a construção para os pontos 2, 3, 4, 5 e 6 da figura 1.13, observa-se que o campo resultante H tem intensidade "constante", porém sua direção vai "girando", completando uma volta no fim de um ciclo.

Assim, quando um enrolamento trifásico é alimentado por correntes trifásicas, cria-se um "campo girante", como se houvesse um único par de pólos girantes, de intensidade constante. Este campo girante, criado pelo enrolamento trifásico do estator, induz tensões nas barras do rotor (linhas de fluxo cortam as barras do rotor) as quais geram correntes, e consequentemente, um campo no rotor, de polaridade oposta à do campo girante. Como campos opostos se atraem e como o campo do estator (campo girante) é rotativo, o rotor tende a acompanhar a rotação deste campo. Desenvolve-se então, no rotor, um conjugado motor que faz com que ele gire, acionando a carga.

1.2.4.2 *VELOCIDADE SÍNCRONA (n_S)*

A velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de pólos (p) do motor e da frequência (f) da rede, em hertz.

Os enrolamentos podem ser construídos com um ou mais pares de pólos, que se distribuem alternadamente (um "norte" e um "sul") ao longo da periferia do núcleo magnético. O campo girante percorre um par de pólos (p) a cada ciclo. Assim, como o enrolamento tem pólos ou p pares de pólos, a velocidade do campo será:

$$n_S = \frac{60 \times f}{p} = \frac{120 \times f}{2p} \quad \text{(rpm)} \qquad (1.2.4.2.1)$$

Exemplo: Qual a rotação síncrona de um motor de 6 pólos, 50Hz?

$$n_S = \frac{120 \times f}{2p} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000\,\text{rpm}$$

Note que o número de pólos do motor terá que ser sempre par, para formar os pares de pólos. Para as frequências e "polaridades" usuais, as velocidades síncronas são:

Nº de pólos	Rotação síncrona por minuto	
	60 Hz	**50Hz**
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750

Tabela 1.2.4.2.1 – Velocidades síncronas para os diferentes números de pólos

Para motores de "dois pólos", o campo percorre uma volta a cada ciclo. Assim, os graus elétricos equivalem aos graus mecânicos. Para motores com mais de dois pólos, tem-se, de acordo com o número de pólos, um giro "geométrico" menor, sendo inversamente proporcional a 360° em dois pólos.

Por exemplo: Para um motor de seis pólos tem-se, em um ciclo completo, um giro do campo de $\frac{360^o \times 2}{6} = 120^o$ geométricos. Isto equivale, logicamente, a 1/3 da velocidade em dois pólos. Conclui-se, assim, que:

Graus geométricos = Graus mecânicos* x *p

1.2.4.3 *ESCORREGAMENTO (s)*

Em um motor elétrico assíncrono, o rotor sempre irá girar com rotação abaixo da rotação do campo girante e, portanto, haverá corrente e torque (conjugado eletromecânico) induzidos. A diferença relativa entre as velocidades do rotor e do fluxo do estator (síncrona) é conhecida como "escorregamento" e é representada por:

$$s_{\%} = \frac{n_S - n}{n_S} \times 100$$

Onde:
- n_S = Velocidade síncrona (rpm);
- n = Velocidade rotórica (rpm);
- s = Escorregamento.

Se o motor gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona (rotação do campo girante), o enrolamento do rotor corta as linhas de força magnéticas do campo girante e, pelas leis do eletromagnetismo, circularão nele correntes induzidas. Quanto maior a carga, maior terá que ser o conjugado necessário para acioná-la. Para obter um maior conjugado, proporcionalmente terá que ser maior a diferença de velocidades entre rotor e o campo girante no estator para que as correntes induzidas e os campos produzidos sejam maiores. Portanto, à medida que a carga aumenta, cai a rotação do motor. Quando a carga for zero (motor a vazio) o rotor irá girar praticamente na rotação síncrona.

A frequência da corrente induzida no rotor é igual ao escorregamento vezes a frequência do estator. Ou seja:

$$f_2 = s \times f_1$$

Onde: f_1 = Frequência da corrente estatórica (Hz);
f_2 = Frequência da corrente rotórica (Hz).

A vazio o escorregamento é muito pequeno, portanto, como no rotor, sua reatância e sua f.e.m. induzida são todas muito pequenas. Assim, a corrente do rotor é reduzida, apenas suficiente para produzir o torque necessário a vazio. O fator de potência é extremamente baixo e em atraso, com cos $\varphi < 0{,}3$, pois a corrente que circula pelo motor é utilizada apenas para a sua magnetização.

Quando uma carga mecânica é aplicada ao rotor, a velocidade decresce um pouco. O pequeno decréscimo na velocidade causa um aumento no escorregamento, na frequência da corrente rotórica, na sua reatância e na sua força eletromotriz induzida. O aumento da corrente induzida no rotor reflete-se num aumento da corrente primária do estator (componente esta que produz potência). Uma corrente maior será produzida no estator, com um melhor fator de potência, tendendo a produzir mais potência mecânica e solicitar mais potência da linha. À plena carga o motor de indução irá girar a um escorregamento que promove o equilíbrio entre o torque desenvolvido pelo motor e o torque resistente da carga.

O fator de potência a plena carga varia de 0,8 (em pequenos motores de aproximadamente 1 cv) a aproximadamente 0,95 (nos grandes motores, acima de 150 cv). Em primeira análise pode parecer que aumentos além da plena carga produzirão melhoria no fator de potência, e aumento na corrente de fase do estator. Porém, com o aumento da carga e do escorregamento, a frequência da corrente rotórica continua a aumentar e o aumento na reatância do rotor produz uma diminuição no fator de potência do mesmo. Portanto, com cargas acima da plena carga, o fator de potência aproxima-se de um máximo e então decresce rapidamente.

1.2.4.4 *EQUACIONAMENTO*

1.2.4.4.1 *CIRCUITO EQUIVALENTE*

Nas situações em que o escorregamento é diferente de 0 e 1, haverá f.e.m. induzida no secundário e, consequentemente haverá conversão eletromecânica com potência em jogo, onde tem-se então um circuito equivalente com os parâmetros e variáveis para o primário e para o secundário :

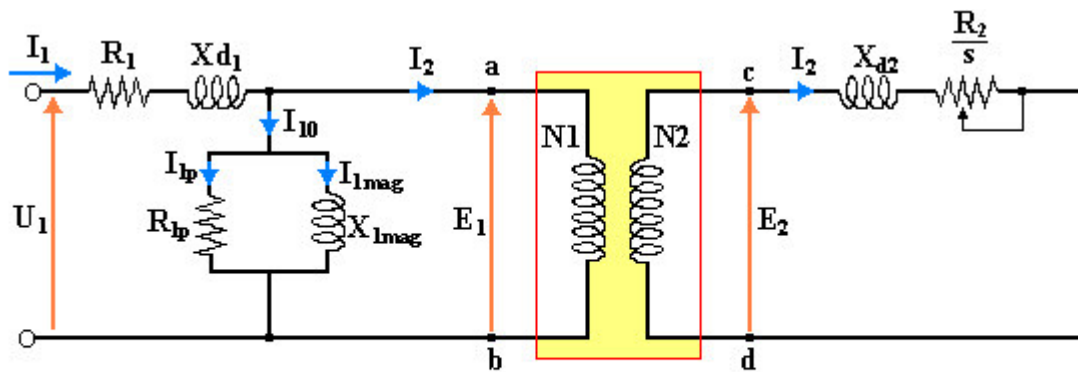



Figura 1.20 – Circuito equivalente por fase de uma máquina assíncrona com escorregamento s, com secundário (rotor) não referido ao primário (estator).

Onde: R_1 = Resistência estatórica;
X_{d1} = Reatância estatórica;
R_2 = Resistência rotórica;
X_{d2} = Reatância rotórica;
X_{1mag} = Reatância de magnetização;
R_{1p} = Resistência de perdas;
E_2 = f.e.m. rotórica.

U_1 = Tensão estatórica;
I_1 = Corrente estatórica;
I_{1p} = Corrente de perdas;
I_{1mag} = Corrente de magnetização;
I_2 = Corrente rotórica;
E_1 = f.c.e.m. estatórica;

1.2.4.4.2 *FORÇA ELETROMOTRIZ E CORRENTE INDUZIDA*

Considere a máquina com um escorregamento não nulo. Haverá indução de f.e.m. no rotor e ela pode ser definida em função do escorregamento. Com o rotor parado, o campo rotativo estatórico gira com a mesma velocidade relativamente aos enrolamentos do rotor e estator, induzindo no rotor, f.e.m. proporcionais à frequência f_1 (frequência da corrente estatórica).

Pela teoria, para motor com rotor bloqueado, tem-se que as tensões induzidas no rotor (f.e.m) e no estator (f.c.e.m) são dadas respectivamente por:

$$E_1 = 4{,}44.f_1.N1.\Phi_m.k_{e1}$$

$$E_2 = 4{,}44.f_2.N2.\Phi_m.k_{e2}$$

Onde: E_1 = Força contra eletromotriz induzida no estator;
E_2 = Força eletromotriz induzida no rotor;
k_{e1} e k_{e2} = Fator de enrolamento do estator e rotor, respectivamente;
N_1 e N_2 = Número de espiras do estator e rotor, respectivamente;
Φ_m = Fluxo de magnetização;
$f_2 = f_1$ para rotor bloqueado.

Na presença de escorregamento tem-se:

$$f_2 = s \times f_1$$

Portanto:

$$E_{2s} = 4{,}44.s.f_1.N2.\Phi_m.k_{e2} \cong s.E_2$$

Esta equação pode ser simplificada, para um estudo mais aproximado da máquina, por:

$$\Phi_m \approx \frac{E_1}{f_1}$$

Que determina sucintamente a relação do fluxo de magnetização entre rotor e estator com a tensão e a frequência aplicada na máquina (estatórica), frequência esta que está relacionada com a rotação no eixo da máquina, não considerando o escorregamento existente entre rotor e estator.

1.2.4.4.3 *CONJUGADO ELETROMAGNÉTICO*

A interação entre a corrente do rotor e o fluxo produzido por cada pólo unitário do campo magnético girante que concatena o condutor do rotor, resulta o conjugado motor, o qual é dado por:

$$C = k.\Phi_m.I_{2s}.\cos\varphi_{2s}$$

Onde:
- k = Constante de conjugado para o número de pólos, o enrolamento, as unidades empregadas, etc.;
- $\cos\varphi_{2s}$ = Fator de potência do circuito rotórico;
- Φ_m = Fluxo de magnetização;
- I_{2s} = Corrente rotórica.

Da mesma forma, para um estudo mais aproximado da máquina, esta equação poderá ser simplificada por:

$$C \approx \Phi_m.I_{2s}$$

Que determina a relação existente entre o torque desenvolvido (solicitado) pela máquina, o fluxo de magnetização entre rotor e estator e a corrente induzida rotórica, que é dada por:

$$I_{2s} = \frac{s \times E_2}{\sqrt{R_2^2 + SX_{d2}^2}} = \frac{s \times E_2}{Z_{2s}}$$

Onde:
- Z_{2s} = Impedância rotórica;
- E_2 = Força eletromotriz induzida no rotor;
- s = Escorregamento.

Nota-se então que o conjugado desenvolvido é função do escorregamento, isto é, com o aumento da carga aplicada à máquina, aumenta-se o escorregamento e consequentemente o torque desenvolvido. Esta relação apresenta um limite, com o qual se consegue obter o conjugado máximo, e a partir do qual, aumentando-se o escorregamento aumenta-se a impedância rotórica diminuindo-se o conjugado, conforme descrito no item a seguir.

1.2.4.4.4 *CONJUGADO DE PARTIDA*

Do desenvolvimento do modelo matemático da máquina assíncrona, demonstra-se que o conjugado é descrito por:

$$C_p = k.E_1^2.\left(\frac{R_2}{R_2^2 + X_{d2}^2}\right)$$

Onde: C_p = Conjugado de partida;
k = Constante de conjugado para o número de pólos, o enrolamento, as unidades empregadas, etc.;
E_1 = Tensão estatórica;
R_2 = Resistência rotórica;
X_{d2} = Reatância rotórica.

Da equação acima pode-se fazer as seguintes considerações:

- No instante da partida, o conjugado não é afetado pela natureza da carga aplicada;
- Desde que para um dado motor de indução tipo gaiola a resistência efetiva do rotor e a reatância de rotor bloqueado sejam constantes, a expressão pode ser escrita por:

$$C_p = k' \times E_1^2$$

Ou seja, o torque de partida é apenas função da tensão aplicada ao enrolamento do estator. Ao reduzir-se a tensão nominal, também se reduzirá a corrente secundária e a primária. Este processo de diminuição da corrente de partida é bastante utilizado nos médios e grandes motores do tipo gaiola, nos casos onde a acentuada redução do conjugado de partida não comprometa o acionamento da carga.

1.2.4.4.5 *DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIAS E PERDAS*

No caso de um acionamento em que a potência solicitada ao motor permanece constante ao longo do tempo, a determinação da potência é relativamente simples, conhecidos o conjugado resistente da carga e a rotação de funcionamento, tem-se:

$$P = \frac{C \times n}{k}$$

É importante ter em mente que a potência solicitada ao motor é definida pelas características da carga, isto é, independentemente da potência nominal do motor.

A potência transmitida à carga pelo eixo do motor é menor que a potência absorvida da rede, devido às perdas no motor. Essas perdas podem ser classificadas em:

- perdas joule no enrolamento estatórico (perdas no cobre);
- perdas joule no enrolamento (ou gaiola) rotórico;
- perdas por atrito e ventilação;
- perdas magnéticas no núcleo (perdas no ferro).

A figura a seguir representa a distribuição destas perdas:

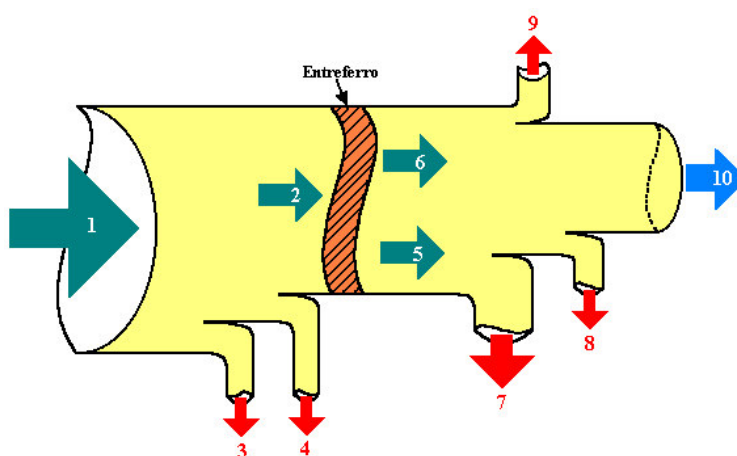



Figura 1.21 – Distribuição da potência e de perdas em máquinas assíncronas.

Onde:

(1) Potência aparente elétrica da rede [(1) = (2)+(3)+(4)];
(2) Potência aparente elétrica do estator a ser transferida ao rotor [$E_1.I_2' = E_2.I_2$];
(3) Perdas primárias (estator) no ferro;
(4) Perdas primárias (estator) no cobre;
(5) Potência aparente elétrica no rotor [$sE_2.I_2$]→ perdas devido ao escorregamento;
(6) Potência mecânica no eixo [$(1- s).E_2.I_2$];
(7) Potência elétrica no rotor que pode ser recuperável, no caso do rotor estar ligado a uma rede externa por meio de anéis;
(8) Perdas elétricas dissipadas no rotor;
(9) Perdas por atrito e ventilação;
(10) Potência resultante no eixo [potência mecânica (6) - perdas por atrito e ventilação (9)];

Para o caso de acionamento de um motor de indução por conversor de frequência, a forma de onda da corrente produzida pelos conversores não é perfeitamente senoidal, pois contém harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem. Portanto as perdas nos motores são maiores.

Além disso, para operações acima da frequência nominal (50 ou 60 Hz), haverá uma redução adicional de conjugado, a qual deve-se ao aumento das perdas no ferro do motor.

Para utilização de motores em frequências superiores à nominal devem portanto ser considerados o aumento das perdas no ferro e também as velocidades limites, função da força

centrífuga nos enrolamentos rotóricos e outras partes mecânicas, como por exemplo, esforço adicional nos rolamentos devido ao desbalanceamento do rotor bem como a velocidade limite do mesmo.

1.2.5 *DEFINIÇÕES DE TERMOS TÉCNICOS USUAIS*

- ***Frequência***: é o número de vezes por segundo que a tensão muda de sentido e volta à condição inicial. É expressa em "ciclos por segundo" ou "Hertz", simbolizada por Hz.
- ***Tensão Máxima ($U_{máx}$)***: é o valor "de pico" da tensão, ou seja, o maior valor instantâneo atingido pela tensão durante um ciclo (este valor é atingido duas vezes por ciclo, uma vez positivo e uma vez negativo).
- ***Corrente Máxima ($I_{máx}$)***: é o valor "de pico" da corrente.
- ***Valor eficaz de Tensão e Corrente (U_{ef} e I_{ef})***: é o valor da tensão e corrente contínuas que desenvolvem potência correspondente a desenvolvida pela corrente alternada. Pode-se demonstrar que o valor eficaz vale:

$$U_{ef} = \frac{U_{máx}}{\sqrt{2}} \qquad \text{e} \qquad I_{ef} = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}}$$

- ***Defasagem (ϕ)***: é o "atraso" da onda de corrente em relação a onda da tensão. Em vez de ser medido em tempo (segundos), este atraso é geralmente medido em ângulo (graus) correspondente a fração de um ciclo completo, considerando 1 ciclo = 360°. A defasagem é freqüentemente expressa pelo coseno do ângulo.

1.3 CARACTERÍSTICAS DA REDE

1.3.1 *O SISTEMA*

No Brasil, o sistema de alimentação pode ser monofásico ou trifásico. O sistema monofásico é utilizado em serviços domésticos, comerciais e rurais, enquanto o sistema trifásico, em aplicações industriais, ambos em 60Hz.

1.3.1.1 *TRIFÁSICO*

As tensões trifásicas mais usadas nas redes industriais são:

- Baixa tensão: 220V, 380V e 440V;
- Média tensão: 2300V, 3300V, 4160V, 6600V e 13800V.

O sistema trifásico estrela de baixa tensão, consiste de três condutores de fase (L_1, L_2, L_3) e o condutor neutro (N), sendo este, conectado ao ponto estrela do gerador ou secundário dos transformadores.

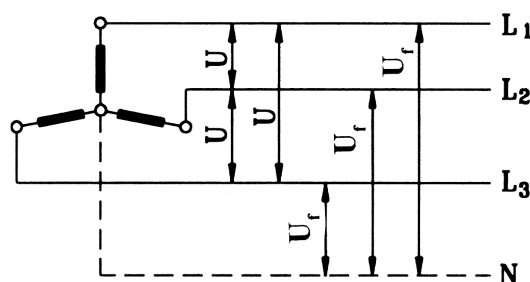



Figura 1.22 – Sistema trifásico

1.3.1.2 *MONOFÁSICO*

As tensões monofásicas padronizadas no Brasil são as de 115V (conhecida como 110V), 127 e 220V.

Os motores monofásicos são ligados à duas fases (tensão de linha U) ou à uma fase e o neutro (tensão de fase U_f). Assim, a tensão nominal do motor monofásico deverá ser igual à tensão U ou U_f do sistema.

Quando vários motores monofásicos são conectados a um sistema trifásico (formado por três sistemas monofásicos), deve-se tornar o cuidado para distribuí-los de maneira uniforme, evitando-se assim, desequilíbrio entre as fases.

1.3.1.2.1 *MONOFÁSICO COM RETORNO POR TERRA (MRT)*

O sistema monofásico com retorno por terra – MRT –, é um sistema elétrico em que a terra funciona como condutor de retorno da corrente de carga. Afigura-se como solução para o emprego no monofásico a partir de alimentadores que não têm o condutor neutro. Dependendo da natureza do sistema elétrico existente e características do solo onde será implantado (geralmente na eletrificação rural), tem-se:

1) Sistema monofilar

É a versão mais prática e econômica do MRT, porém, sua utilização só é possível onde a saída da subestação de origem é estrela-triângulo.

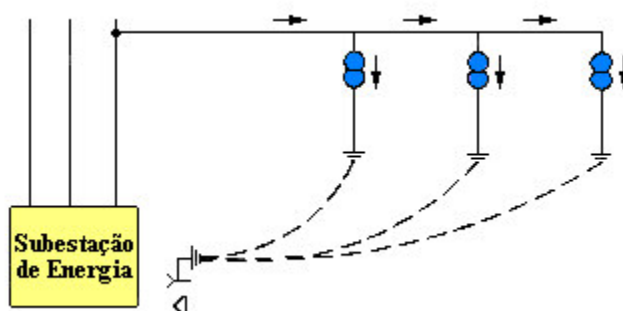



Figura 1.23 – Sistema monofilar

2) Sistema monofilar com transformador de isolamento

Este sistema possui algumas desvantagens, além do custo do transformador, como:

- Limitação da potência do ramal à potência nominal do transformador de isolamento;
- Necessidade de reforçar o aterramento do transformador de isolamento pois na sua falta, cessa o fornecimento de energia para todo o ramal.

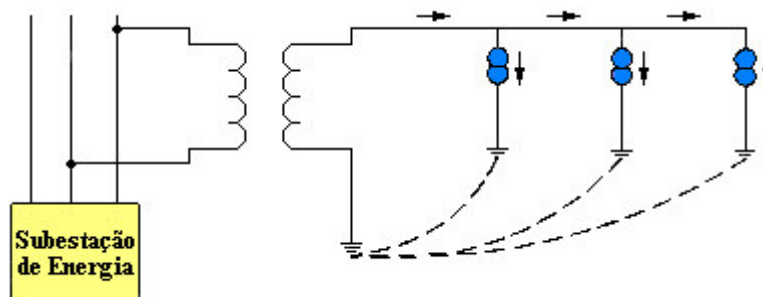



Figura 1.24 – Sistema monofilar com transformador de isolamento

3) Sistema MRT na versão neutro parcial

É empregado como solução para a utilização do MRT em regiões de solos de alta resistividade, quando se torna difícil obter valores de resistência de terra dos transformadores dentro dos limites máximos estabelecidos no projeto.

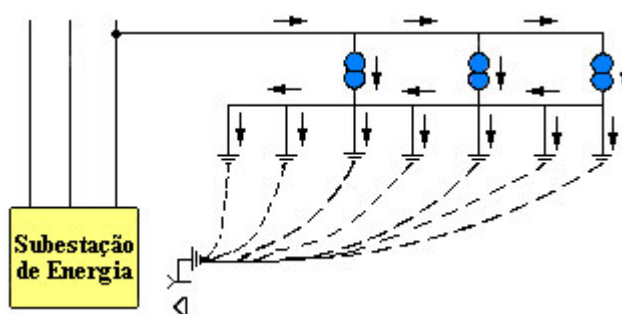



Figura 1.25 – Sistema MRT na versão neutro parcial

1.3.2 *TENSÃO NOMINAL*

É a tensão de rede para a qual o motor foi projetado.

1.3.2.1 *TENSÃO DA REDE DE ALIMENTAÇÃO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR*

Atualmente não há um padrão mundial para a escolha da tensão de alimentação em função da potência do motor. Entre os principais fatores que são considerados, pode-se citar:

- Nível de tensão disponível no local;
- Limitações da rede de alimentação com referência à corrente de partida;
- Distância entre a fonte de tensão (subestação) e a carga;
- Custo do investimento, entre baixa e alta tensão para potências entre 150 e 450kW.

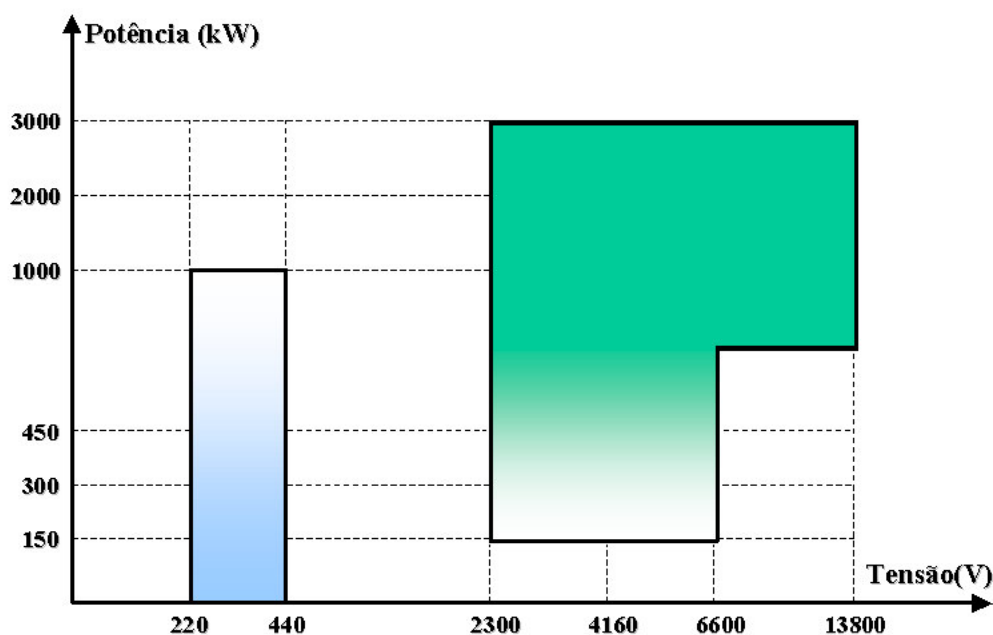



Figura 1.26 – Tensões normalmente utilizadas em função da potência do motor

1.3.2.2 *TENSÃO NOMINAL MÚLTIPLA*

A grande maioria dos motores é fornecida com terminais do enrolamento religáveis, de modo a poderem funcionar em redes de pelo menos duas tensões diferentes. Os principais tipos de religação de terminais de motores para funcionamento em mais de uma tensão são:

1.3.2.2.1 *LIGAÇÃO SÉRIE-PARALELA*

O enrolamento de cada fase é dividido em duas partes (lembrar que o número de pólos é sempre par, de modo que este tipo de ligação é sempre possível). Ligando as duas metades em série, cada metade ficará com a metade da tensão de fase nominal do motor. ligando as duas metades em paralelo, o motor poderá ser alimentado com uma tensão igual à metade da tensão anterior, sem que se altere a tensão aplicada a cada bobina.

Este tipo de ligação exige nove terminais no motor e a tensão nominal (dupla) mais comum, é 220/440V, ou seja, o motor é religado na ligação paralela quando alimentado com 220V e na ligação série quando alimentado em 440V. A figura 1.27 mostra a numeração normal dos terminais e o esquema de ligação para estes tipos de motores, tanto para motores ligados em estrela como em triângulo. O mesmo esquema serve para outras duas tensões quaisquer, desde que uma seja o dobro da outra, por exemplo, 230/460V.

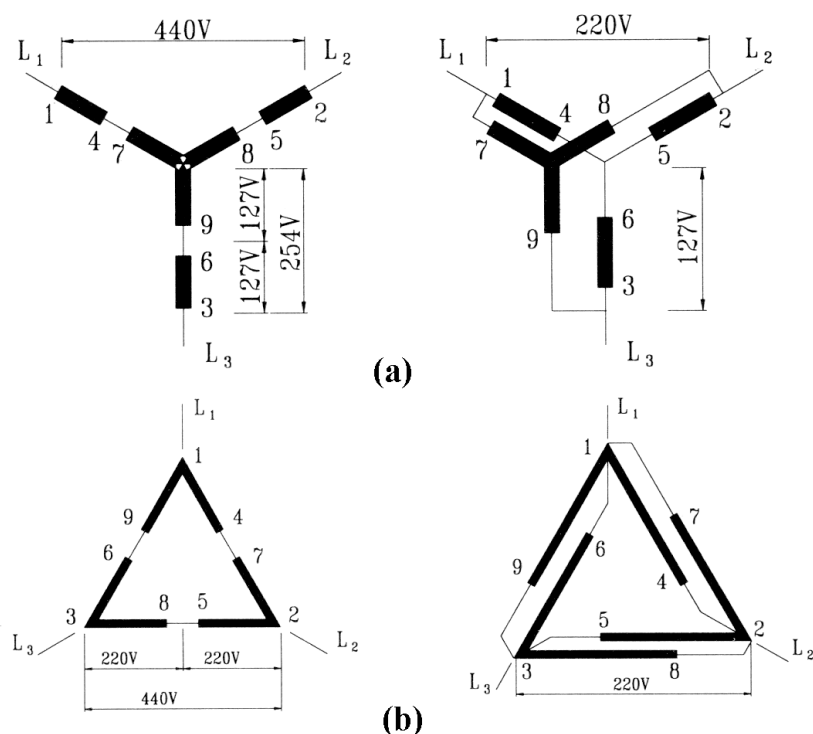



Figura 1.27 – Ligação série-paralelo

1.3.2.2.2 *LIGAÇÃO ESTRELA-TRIÂNGULO*

O enrolamento de cada fase tem as duas pontas trazidas para fora do motor. Se ligar as três fases em triângulo, cada fase receberá a tensão da linha, por exemplo, 220 volts (figura 1.28). Se ligar as três fases em estrela, o motor pode ser ligado a uma linha com tensão igual a $220\sqrt{3} = 380$ volts sem alterar a tensão no enrolamento que continua igual a 220 volts por fase, pois:

$$U_f = U\sqrt{3}$$

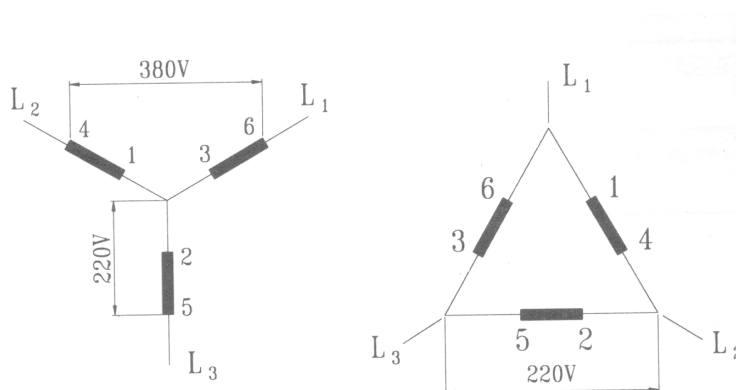



Figura 1.28 – Ligação estrela-triângulo

Este tipo de ligação exige seis terminais no motor e serve par quaisquer tensões nominais duplas, desde que a segunda seja igual à primeira multiplicada por $\sqrt{3}$.

Exemplo: 220/380V – 380/660V – 440/760V.

Nos exemplos 380/660V e 440/760V, a tensão maior declarada só serve para indicar que o motor pode ser acionado através de uma chave de partida estrela-triângulo.

Motores que possuem tensão nominal de operação acima de 600V deverão possuir um sistema de isolação especial, apto a esta condição.

1.3.2.2.3 *TRIPLA TENSÃO NOMINAL*

Pode-se combinar os dois casos anteriores: o enrolamento de cada fase é dividido em duas metades para ligação série-paralelo. Além disso, todos os terminais são acessíveis para poder-se ligar as três fases em estrela ou triângulo. Deste modo, tem-se quatro combinações possíveis de tensão nominal:

1) Ligação triângulo paralelo;

2) Ligação estrela paralela, sendo igual a $\sqrt{3}$ vezes a primeira;

3) Ligação triângulo série, valendo o dobro da primeira;

4) Ligação estrela série, valendo $\sqrt{3}$ vezes a terceira. Mas, como esta tensão seria maior que 600V, é indicada apenas como referência de ligação estrela-triângulo.

Exemplo: 220/380/440/(760) V

Este tipo de ligação exige 12 terminais e a figura 1.29 mostra a numeração normal dos terminais e o esquema de ligação para as três tensões nominais.

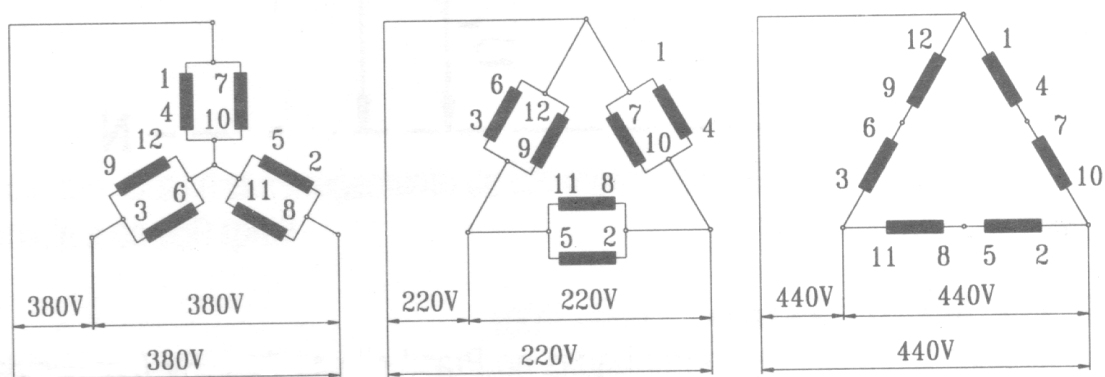



Figura 1.29

1.3.2.3 *TENSÕES DE LIGAÇÕES NORMAIS*

A tabela 1.3.2.4.1 mostra as tensões nominais múltiplas mais comuns em motores trifásicos e sua aplicação às tensões de rede usuais:

Observações:

- A partida direta ou com chave compensadora é possível em todos os casos abaixo;
- A ligação para 660V ou 760V é usada somente para ligação com chave estrela-triângulo. Todas as ligações para as diversas tensões são feitas pelos terminais, localizados na caixa de ligação;
- Todo motor traz o esquema para estas ligações, impresso na placa de identificação.

Execução dos enrolamentos	Tensão de Serviço	Partida com chave estrela-triângulo
220/380	220V 380V	Sim Não
220/440/230/460	220V/230V 440V/460V	Não Não
380/660	380V	Sim
220/380/440/760	220V 380V 440V	Sim Não Sim

Tabela 1.3.2.4.1 – Ligações normais dos enrolamentos dos motores trifásicos

1.3.3 FREQUÊNCIA NOMINAL (HZ)

É a frequência da rede para a qual o motor foi projetado

1.3.3.1 TOLERÂNCIA DE VARIAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA

Conforme a norma NBR 7094, o motor elétrico de indução deve ser capaz de funcionar de maneira satisfatória dentro das possíveis combinações das variações de tensão e frequência classificados em zona A ou zona B, conforme figura 1.30.

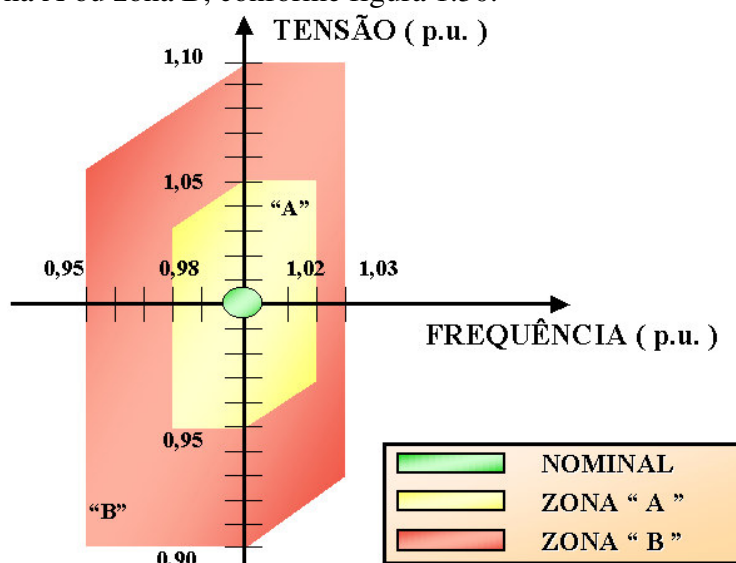



Figura 1.30 – Limites das variações de tensão e de frequência em funcionamento

ZONA A

- O motor deverá desempenhar sua função principal continuamente (assegurar o seu conjugado nominal);
- O motor terá desvios em suas características de desempenho à tensão e frequências nominais (rendimento, fator de potência, etc.);
- Haverá elevações de temperatura superiores àquelas a tensão e frequência nominais (podem exceder em aproximadamente 10K os limites especificados pela norma);

ZONA B

- O motor deverá desempenhar sua função principal (assegurar o seu conjugado nominal);
- O motor terá desvios em suas características de desempenho, à tensão e frequência nominais, superiores àqueles da zona A
- Existirá elevações de temperatura superiores àquelas a tensão e frequência nominais e superiores às da zona "A";

Ainda quanto aos limites de tensão e frequência, a norma define um acréscimo na elevação de temperatura ou na temperatura total do motor quando há uma variação simultânea da tensão e da frequência. Para as condições de operação nos limites da zona A (ver figura 1.30), as elevações de temperatura e a temperatura total podem exceder em aproximadamente 10K os limites especificados, em contra partida o motor deve assegurar o seu conjugado nominal. Quanto as características de desempenho, elas podem sofrer variações (tanto na zona A quanto na zona B – mais acentuada nesta última, por este motivo a NBR recomenda o não funcionamento prolongado na periferia da zona B). Entretanto a norma não estabelece os limites. Assim sendo, o motor deve ser capaz de funcionar dentro das zonas A e B, fornecendo conjugado nominal.

O efeito aproximado da variação da tensão sobre as características do motor está mostrado na tabela abaixo:

Desempenho do motor	Tensão 20% acima da nominal	Tensão 10% acima da nominal	Tensão 10% abaixo da nominal
Conjugado de partida e conjugado máximo	Aumenta 44%	Aumenta 21%	Diminui 19%
Corrente de partida	Aumenta 25%	Aumenta 10 a 12%	Diminui 10 a 12%
Corrente de plena carga	Diminui 11%	Diminui 7%	Aumenta 11%
Escorregamento	Diminui 30%	Diminui 17%	Aumenta 23%
Rotação	Aumenta 1,5%	Aumenta 1%	Diminui 1,5%
Rendimento	Pequeno aumento	Aumenta 1%	Diminui 2%
Fator de potência	Diminui 5 a 15%	Diminui 3%	Aumenta 1%
Temperatura	Diminui 5 ºC	Diminui 3 ºC	Aumenta 6 ºC
Ruído magnético sem carga	Aumento perceptível	Ligeiro aumento	Ligeira diminuição

Tabela 1.3.3.1.1 – Efeito aproximado da variação da tensão

O efeito aproximado da variação da frequência sobre as características do motor está mostrado na tabela 1.3.3.1.2.

Motor enrolado para 50Hz	Ligação em 60 Hz	Rotação Nominal	Potência Nominal	Conjugado Nominal	Corrente Nominal	Conjugado de partida	Conjugado máximo	Corrente de partida
						Todos valores em tantas vezes o nominal		
U	U	Fator de transformação para funcionamento em 60Hz						
220V	220V	1,20	1,00	0,83	1,00	0,83	0,83	0,83
380V	380V	1,20	1,00	0,83	1,00	0,83	0,83	0,83
380V	440V	1,20	1,15	0,96	1,00	0,96	0,96	0,96
440V	440V	1,20	1,00	0,83	1,00	0,83	0,83	0,83
500V	500V	1,20	1,00	0,83	1,00	0,83	0,83	0,83
500V	550V	1,20	1,10	0,91	1,00	0,91	0,91	0,91
660V	660V	1,20	1,00	0,83	1,00	0,83	0,83	0,83

Tabela 1.3.3.1.2 – variação no funcionamento de motores de 50Hz ligados em 60Hz.

Obs.: para ligação em outras frequências deverá ser consultada a fábrica.

1.3.3.2 *LIGAÇÃO EM FREQUÊNCIAS DIFERENTES*

Motores trifásicos bobinados para 50Hz poderão ser ligados também em rede de 60Hz.

a) Ligando o motor de 50Hz, com a mesma tensão, em 60Hz:

- A potência do motor será a mesma;
- A corrente nominal é a mesma;
- A corrente de partida diminui em 17%;
- conjugado de partida diminui em 17%;
- conjugado máximo diminui em 17%;
- A velocidade nominal aumenta em 20%.

Nota: deverão ser observados os valores de potência requeridas, para motores que acionam equipamentos que possuem conjugados variáveis com a rotação.

b) Se alterar a tensão em proporção à frequência:

- Aumenta a potência do motor 20%;
- A corrente nominal é a mesma;
- A corrente de partida será aproximadamente a mesma;
- conjugado de partida será aproximadamente o mesmo;
- A rotação nominal aumenta 20%.

Quando o motor for ligado em 60Hz com a bobinagem 50Hz, pode-se aumentar a potência em 15% para II pólos e 20% para IV, VI e VIII pólos.

1.3.4 LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE PARTIDA DE MOTORES TRIFÁSICOS

Sempre que possível, a partida de um motor trifásico de gaiola, deverá ser direta, por meio de contatores. Deve ter-se em conta que para um determinado motor, as curvas de conjugado e correntes são fixas, independente da dificuldade de partida, para uma tensão constante.

Nos casos em que a corrente de partida do motor é elevada podem ocorrer as seguintes conseqüências prejudiciais:

- Elevada queda de tensão no sistema de alimentação da rede. Em função disto, provoca a interferência em equipamentos instalados no sistema;
- Os sistema de proteção (cabos, contatores) deverá ser superdimensionado, ocasionando um custo elevado;
- A imposição das concessionárias de energia elétrica que limitam a queda de tensão da rede.

Caso a partida direta não seja possível, devido aos problemas citados acima, pode-se usar sistema de partida indireta para reduzir a corrente de partida. Estes sistemas de partida indireta (tensão reduzida) são:

- Chave estrela-triângulo;
- Chave compensadora;
- Chave série-paralelo;
- Reostato;
- Partidas eletrônicas (soft-starter e inversor de frequência).

1.3.4.1 PARTIDA COM CHAVE ESTRELA-TRIÂNGULO (Y-Δ)

É fundamental para a partida com a chave estrela-triângulo que o motor tenha a possibilidade de ligação em dupla tensão, ou seja, em 220/380V, em 380/660V, 440/760V, em 1350/2300V, em 2400/4160Vou 3800/6600V. Os motores deverão ter no mínimo seis bornes de ligação. A partida estrela-triângulo poderá ser usada quando a curva de conjugados do motor é suficientemente elevada para poder garantir a aceleração da máquina com corrente reduzida. Na ligação estrela, o conjugado fica reduzido par 25 a 33% do conjugado de partida na ligação triângulo. Por este motivo, sempre que for necessária uma partida estrela-triângulo, deverá ser usado um motor com curva de conjugado elevado.

Os motores WEG têm alto conjugado máximo e de partida, sendo, portando, ideais para a maioria dos casos, para uma partida estrela-triângulo. Entretanto, o alto custo dos contatores e/ou disjuntores a vácuo, inviabiliza este tipo de partida para motores de alta tensão.

Antes de decidir por uma partida estrela-triângulo, será necessário verificar se o conjugado de partida será suficiente para operar a máquina. O conjugado resistente da carga não poderá ultrapassar o conjugado de partida do motor (figura 1.31), nem a corrente no instante da mudança para triângulo poderá ser de valor inaceitável.

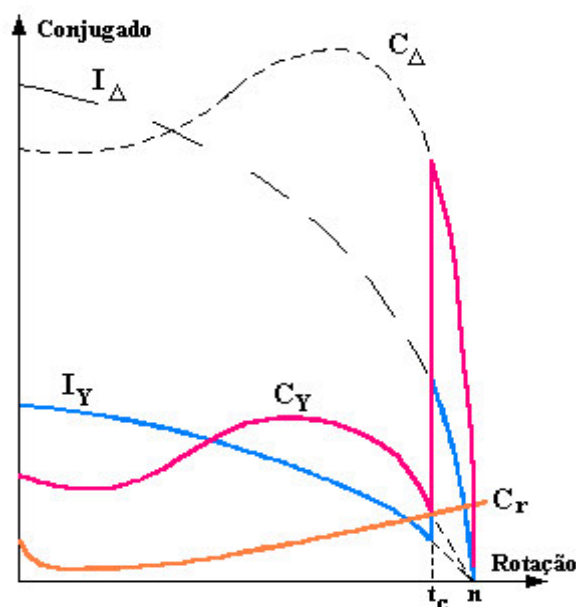



Figura 1.31 – Corrente e conjugado para partida estrela-triângulo
de um motor de gaiola acionando uma carga com conjugado resistente C_r.

Onde:
- I_Δ = corrente em triângulo;
- I_Y = corrente em estrela;
- C_Y = conjugado em estrela;
- C_Δ = conjugado em triângulo;
- C_r = conjugado resistente;
- t_c = tempo de comutação.

Esquematicamente, a ligação estrela-triângulo num motor para uma rede de 220V é feita da maneira indicada na figura 1.32, notando-se que a tensão por fase durante a partida é reduzida para 127V

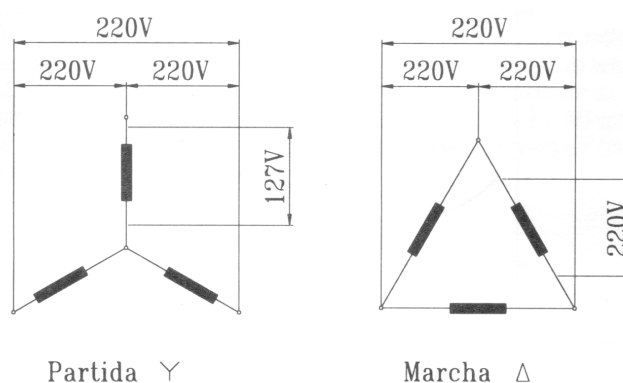



Figura 1.32

1.3.4.2 *PARTIDA COM CHAVE COMPENSADORA (AUTO-TRANSFORMADOR)*

A chave compensadora pode ser usada para a partida de motores sob carga. Ela reduz a corrente de partida, evitando uma sobrecarga no circuito, deixando, porém, o motor com um conjugado suficiente para a partida e aceleração. A tensão na chave compensadora é reduzida através de auto-transformador que possui normalmente taps de 50, 65 e 80% da tensão nominal.

Para os motores que partirem com uma tensão menor que a tensão nominal, a corrente e o conjugado de partida devem ser multiplicados pelos fatores K_1 (fator de multiplicação da corrente) e K_2 (fator de multiplicação do conjugado) obtidos na figura 1.33.

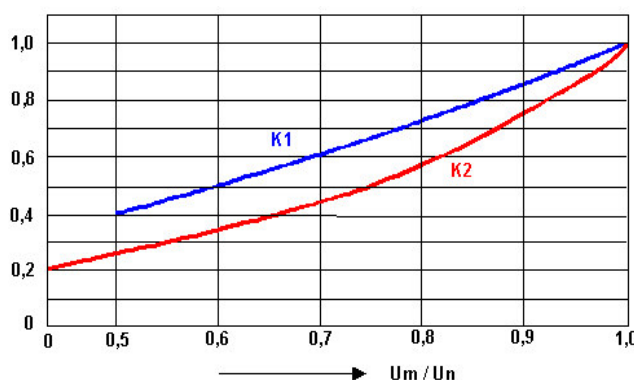



Figura 1.33 – Fatores de redução K_1 e K_2 em função das relações de tensão do motor e da rede U_m/U_n

Exemplo: Para 85% da tensão nominal;

$$\left(\frac{I_p}{I_n}\right)_{85\%} = K_1 \times \left(\frac{I_p}{I_n}\right)_{100\%} = 0{,}8 \times \left(\frac{I_p}{I_n}\right)_{100\%}$$

$$\left(\frac{C_P}{C_n}\right)_{85\%} = K_2 \times \left(\frac{C_P}{C_n}\right)_{100\%} = 0{,}66 \times \left(\frac{C_P}{C_n}\right)_{100\%}$$

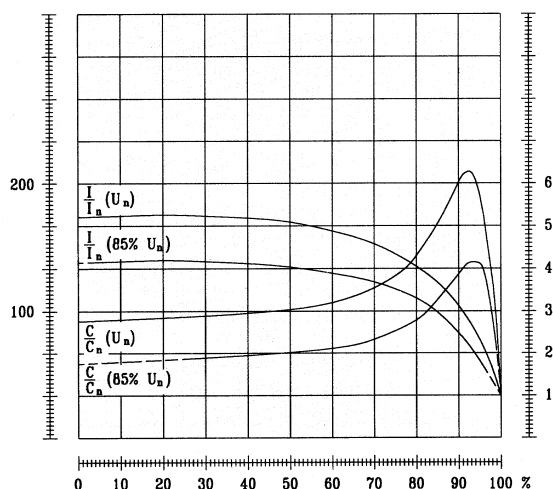



Figura 1.34 – Exemplo das características de desempenho de um motor de 425 cv, VI pólos, quando parte com 85% da tensão

1.3.4.3 *COMPARAÇÃO ENTRE CHAVES "Y-Δ" E COMPENSADORA "AUTOMÁTICA"*

- ***Estrela-Triângulo (automática):***

Vantagens:

a) A chave estrela-triângulo é muito utilizada por seu custo reduzido para baixas tensões;
b) Não tem limite quanto ao número de manobras;
c) Os componentes ocupam pouco espaço;
d) A corrente de partida fica reduzida para aproximadamente 1/3.

Desvantagens:

a) A chave só pode ser aplicada a motores cujos seis bornes ou terminais sejam acessíveis;
b) A tensão da rede deve coincidir com a tensão em triângulo do motor;
c) Com a corrente de partida reduzida para aproximadamente 1/3 da corrente nominal, reduz-se também o momento de partida para 1/3;
d) Caso o motor não atingir pelo menos 90% de sua velocidade nominal, o pico de corrente na comutação de estrela para triângulo será quase como se fosse uma partida direta, o que se torna prejudicial aos contatos dos contatores e não traz nenhuma vantagem para a rede elétrica.

- ***Chave Compensadora (automática):***

Vantagens:

a) No tap de 65% a corrente de linha é aproximadamente igual a da chave estrela-triângulo, entretanto, na passagem da tensão reduzida para a tensão da rede, o motor não é desligado e o segundo pico é bem reduzido, visto que o auto-trafo por curto tempo se torna uma reatância;
b) É possível a variação do tap de 65 para 80% ou até para 90% da tensão da rede, a fim de que o motor possa partir satisfatoriamente.

Desvantagens:

a) A grande desvantagem é a limitação de sua frequência de manobras. Na chave compensadora automática é sempre necessário saber a sua frequência de manobra para determinar o auto-trafo de acordo.
b) A chave compensadora é bem mais cara do que a chave estrela-triângulo, devido ao auto-trafo;
c) Devido ao tamanho do auto-trafo, a construção se torna volumosa, necessitando quadros maiores, o que torna o seu preço elevado.

1.3.4.4 *PARTIDA COM CHAVE SÉRIE-PARALELO*

Para partida em série-paralelo é necessário que o motor seja religável para duas tensões, a menor delas igual a da rede e a outra duas vezes maior.

Este tipo de ligação exige nove terminais no motor e a tensão nominal mais comum é 220/440V, ou seja: durante a partida o motor é ligado na configuração série até atingir sua rotação nominal e, então, faz-se a comutação para a configuração paralelo.

1.3.4.5 *PARTIDA COM REOSTATO PARA MOTORES DE ANÉIS*

O motor de indução de anéis pode ter uma família de curvas conjugado x velocidade, através da inserção de resistências externas no circuito rotórico. Desta maneira, para uma dada velocidade, é possível fazer o motor fornecer qualquer valor de conjugado, até o limite do conjugado máximo. Assim é possível fazer com que o motor tenha altos conjugados na partida com correntes relativamente baixas, bem como fazê-lo funcionar numa dada velocidade com o valor de conjugado desejado.

Em cada uma das curvas da família de curvas, o motor comporta-se de maneira que à medida que a carga aumenta, a rotação cai gradativamente. À velocidade síncrona, o conjugado motor torna-se igual a zero.

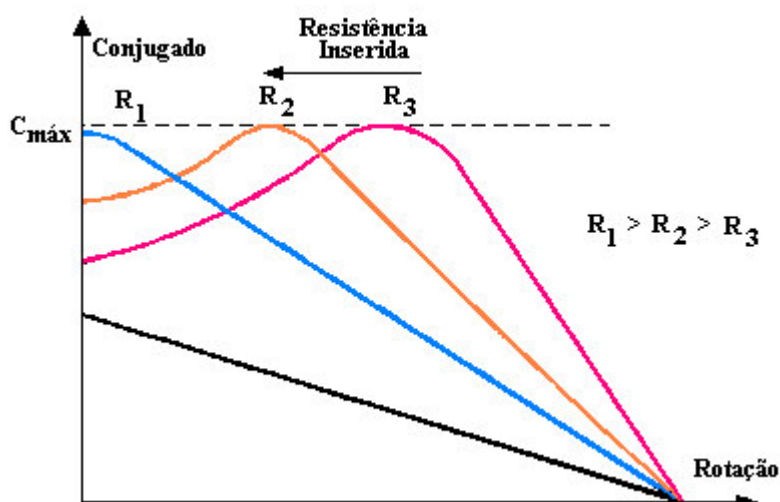



Figura 1.35 – Família de curvas de conjugado x rotação para motores de anéis

A utilização de motores de anéis, baseia-se na seguinte equação:

$$s = \frac{3 \times R_2 \times I_2^2}{\omega_0 \times T} = \frac{p_{j2}}{\omega_0 \times T} \qquad (1.3.4.5.1)$$

Onde:
- s = escorregamento;
- R_2 = resistência rotórica (Ω);
- I_2 = corrente rotórica (A);
- ω_0 = rotação síncrona (rad/s);
- T = torque ou conjugado do rotor (Nm);
- p_{j2} = perdas no rotor (W).

A inserção de uma resistência externa no rotor faz com que o motor aumente o "s", provocando a variação de velocidade. Na figura 1.35, vê-se o efeito do aumento da resistência externa inserida ao rotor.

1.3.4.6 *PARTIDAS ELETRÔNICAS*

1.3.4.6.1 *SOFT-STARTER*

O avanço da eletrônica permitiu a criação da chave de partida a estado sólido a qual consiste de um conjunto de pares de tiristores (SCR, ou combinações de tiristores/diodos), um em cada borne de potência do motor.

O ângulo de disparo de cada par de tiristores é controlado eletronicamente para uma tensão variável aos terminais do motor durante a "aceleração". Este comportamento é, muitas vezes, chamado de "partida suave" (soft-starter). No final do período de partida, ajustável conforme a aplicação, a tensão atinge seu valor pleno após uma aceleração suave ou uma rampa ascendente, ao invés de ser submetido a incrementos ou "saltos" repentinos, como ocorre com os métodos de partida por auto-transformador, ligação estrela-triângulo, etc. Com isso, consegue-se manter a corrente de partida próxima da nominal e com suave variação, como desejado.

Além da vantagem do controle da tensão (e por conseqüência da corrente) durante a partida, a chave eletrônica apresenta, também, a vantagem de não possuir partes móveis ou que gerem arco elétrico, como nas chaves mecânicas. Este é um dos pontos fortes das chaves eletrônicas, pois sua vida útil é bem mais longa (até centenas de milhões de manobras).

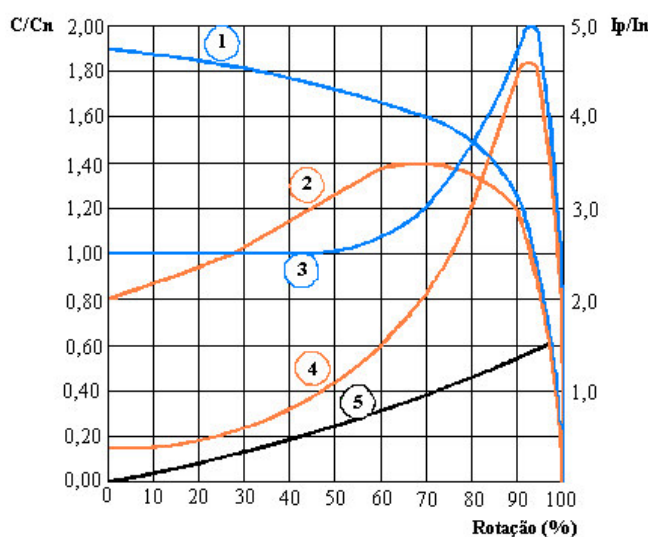



Figura 1.36 – Partida direta e com soft-starter

1 – Corrente de partida direta;
2 – Corrente de partida com soft-starter;
3 – Conjugado com partida direta;
4 – Conjugado com soft-starter;
5 – Conjugado da carga.

1.3.5 *SENTIDO DE ROTAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS*

Um motor de indução trifásico trabalhará em qualquer sentido dependendo da conexão com a fonte elétrica. Para inverter o sentido de rotação, inverte-se qualquer par de conexões entre motor e fonte elétrica.

Os motores WEG possuem ventilador bidirecional, proporcionando sua operação em qualquer sentido de rotação, sem prejudicar a refrigeração do motor.

1.4 CARACTERÍSTICAS DE ACELERAÇÃO

1.4.1 *CONJUGADOS*

1.4.1.1 *CURVA DE CONJUGADO X VELOCIDADE*

Conforme foi explicado anteriormente, o motor de indução tem conjugado igual a zero à velocidade síncrona. À medida que a carga vai aumentando, a rotação do motor vai caindo gradativamente, até um ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver em rotação normal. Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o rotor. Representando num gráfico a variação do conjugado com a velocidade para um motor normal, vai-se obter uma curva com aspecto representado na figura 1.42.

C_0 – Conjugado básico: é o conjugado calculado em função da potência e velocidade síncrona;

$$C_0(kgfm) = \frac{716 \times P(cv)}{n_S(rpm)} = \frac{794 \times P(kW)}{n_S(rpm)}$$

$$C_0(Nm) = \frac{7094 \times P(cv)}{n_S(rpm)} = \frac{9555 \times P(kW)}{n_S(rpm)}$$

C_n – Conjugado nominal ou de plena carga: é o conjugado desenvolvido pelo motor à potência nominal, sob tensão e freqüência nominais;

n_N – Rotação nominal;

n_S – Rotação síncrona.

$C_{mín}$ – Conjugado mínimo: é o menor conjugado desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo.

Na prática, este valor não deve ser muito baixo, isto é, a curva não deve apresentar uma depressão acentuada na aceleração, para que a partida não seja muito demorada, sobreaquecendo o motor, especialmente nos casos de alta inércia ou partida com tensão reduzida;

$C_{máx}$ – Conjugado máximo: é o maior conjugado desenvolvido pelo motor, sob tensão e freqüência nominais, sem queda brusca de velocidade.

Na prática, o conjugado máximo deve ser o mais alto possível, por duas razões principais:

- O motor deve ser capaz de vencer, sem grandes dificuldades, eventuais picos de carga como pode acontecer em certas aplicações, como em britadores, calandras, misturadores e outras.

- O motor não deve arriar, isto é, perder bruscamente a velocidade, quando ocorrem quedas de tensão, momentaneamente, excessivas.

C_p – Conjugado com rotor bloqueado ou conjugado de partida ou, ainda, conjugado de arranque: é o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor bloqueado, para todas as posições angulares do rotor, sob tensão e freqüência nominais;

Comentários:

a) Esta definição leva em consideração o fato de que o conjugado com o rotor bloqueado pode variar um pouco conforme a posição em que se trava o motor.

b) Este conjugado pode ser expresso em Nm ou, mais comumente, em percentagem do conjugado nominal.

$$C_p(\%) = \frac{C_p(Nm)}{C_n(Nm)} \times 100$$

c) Na prática, o conjugado de rotor bloqueado deve ser o mais alto possível, para que o rotor possa vencer a inércia inicial da carga e possa acelerá-la rapidamente, principalmente quando a partida é com tensão reduzida.

Na curva abaixo destaca-se e define-se alguns pontos importantes. Os valores dos conjugados relativos a estes pontos são especificados pela norma NBR 7094 da ABNT, e serão apresentados a seguir:

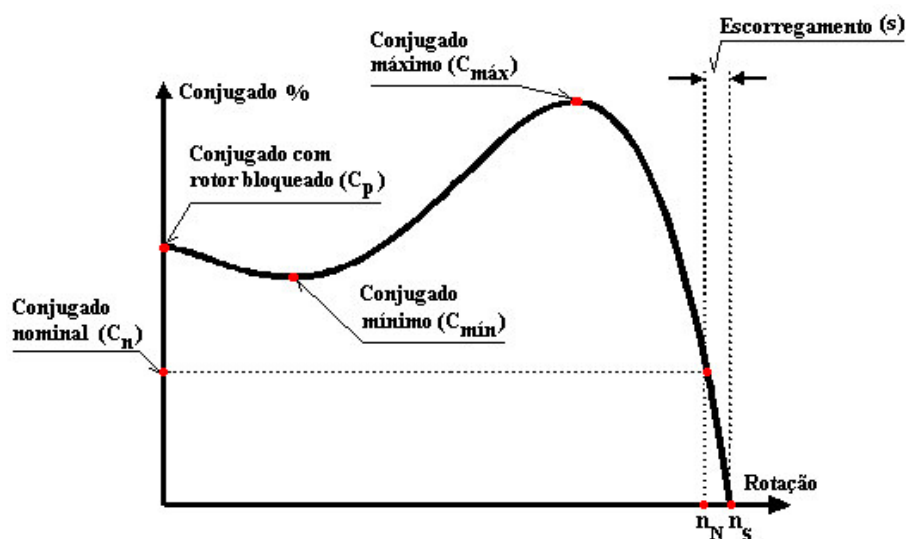



Figura 1.42 – Curva conjugado x rotação

1.4.1.2 *CATEGORIAS – VALORES MÍNIMOS NORMALIZADOS*

Conforme suas características de conjugado em relação a velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola são classificados em categorias,

cada uma adequada a um tipo de carga. Estas categorias são definidas em norma (NBR 7094), e são as seguintes:

1.4.1.2.1 *CATEGORIA N*

Conjugado de partida normal, corrente de partida normal, baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, com baixo conjugado de partida, como: bombas e máquinas operatrizes (conjugado linear e parabólico).

1.4.1.2.2 *CATEGORIA H*

Conjugado de partida alto, corrente de partida normal, baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado na partida, como peneiras, transportadores carregados, cargas de alta inércia, etc., (conjugado constante).

1.4.1.2.3 *CATEGORIA D*

Conjugado de partida alto, corrente de partida normal, alto escorregamento (mais de 5%). Os motores WEG apresentam escorregamentos nas faixas de 5 a 8% e de 8 a 13%. Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos e cargas que necessitam de conjugados de partida muito altos e corrente de partida limitada.

As curvas conjugado x velocidade das diferentes categorias são mostrados na figura 1.43. A norma NBR-7094 especifica os valores mínimos de conjugados exigidos para motores de categoria N, H e D. Estes valores de norma são mostrados nas tabelas (1.4.1.2.1) e (1.4.1.2.2).

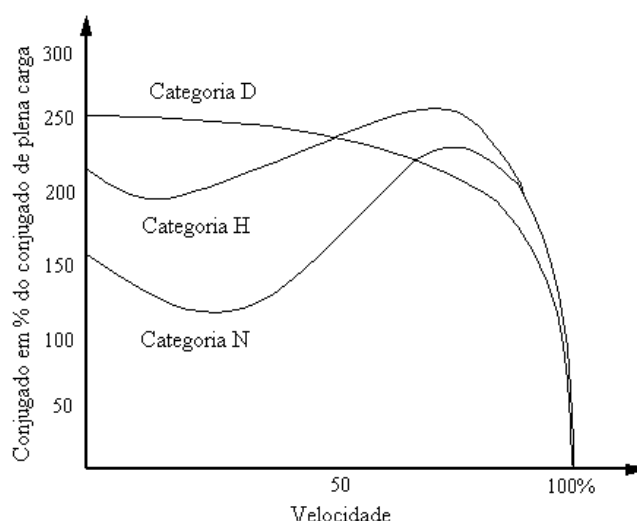



Figura 1.43 – Curvas Conjugados x Velocidade das Diferentes Categorias

Número de Pólos		2			4			6			8		
Faixas de potências nominais		C_P	C_{MIN}	$C_{MÁX}$	C_P	C_{MIN}	$C_{MÁX}$	C_P	C_{MIN}	$C_{MÁX}$	C_P	C_{MIN}	$C_{MÁX}$
cv	kW	pu											
> 0,54 <= 0,63	> 0,40 <= 0,63	1.9	1.3	2.0	2.0	1.4	2.0	1.7	1.2	1.7	1.5	1.1	1.6
> 0,86 <= 1,40	> 0,63 <= 1,00	1.8	1.2	2.0	1.9	1.3	2.0	1.7	1.2	1.8	1.5	1.1	1.7
> 1,40 <= 2,20	> 1,00 <= 1,60	1.8	1.2	2.0	1.9	1.3	2.0	1.6	1.1	1.9	1.4	1.0	1.8
> 2,20 <= 3,40	> 1,60 <= 2,50	1.7	1.1	2.0	1.8	1.2	2.0	1.6	1.1	1.9	1.4	1.0	1.8
> 3,40 <= 5,40	> 2,50 <= 4,00	1.6	1.1	2.0	1.7	1.2	2.0	1.5	1.1	1.9	1.3	1.0	1.8
> 5,40 <= 8,60	> 4,00 <= 6,30	1.5	1.0	2.0	1.6	1.1	2.0	1.5	1.1	1.9	1.3	1.0	1.8
> 8,60 <= 14,00	> 6,30 <= 10,00	1.5	1.0	2.0	1.6	1.1	2.0	1.5	1.1	1.8	1.3	1.0	1.7
> 14,00 <= 22,00	> 10,00 <= 16,00	1.4	1.0	2.0	1.5	1.1	2.0	1.4	1.0	1.8	1.2	0.9	1.7
> 22,00 <= 34,00	> 16,00 <= 25,00	1.3	0.9	1.9	1.4	1.0	1.9	1.4	1.0	1.8	1.2	0.9	1.7
> 34,00 <= 54,00	> 25,00 <= 40,00	1.2	0.9	1.9	1.3	1.0	1.9	1.3	1.0	1.8	1.2	0.9	1.7
> 54,00 <= 86,00	> 40,00 <= 63,00	1.1	0.8	1.8	1.2	0.9	1.8	1.2	0.9	1.7	1.1	0.8	1.7
> 86,00 <= 140,00	> 63,00 <= 100,00	1.0	0.8	1.8	1.1	0.8	1.8	1.1	0.8	1.7	1.0	0.7	1.6
> 140,00 <= 220,00	> 100,00 <= 160,00	0.9	0.7	1.7	1.0	0.8	1.7	1.0	0.8	1.7	0.9	0.7	1.6
> 220,00 <= 340,00	> 160,00 <= 250,00	0.8	0.6	1.7	0.9	0.7	1.7	0.9	0.7	1.6	0.9	0.7	1.6
> 340,00 <= 540,00	> 250,00 <= 400,00	0.75	0.6	1.6	0.75	0.6	1.6	0.75	0.6	1.6	0.75	0.6	1.6
> 540,00 <= 860,00	> 400,00 < = 630,00	0.65	0.5	1.6	0.65	0.5	1.6	0.65	0.5	1.6	0.65	0.6	1.6

Tabela (1.4.1.2.1) – Conjugado com rotor bloqueado (C_P), Conjugado mínimo de partida ($C_{mín}$) e Conjugado máximo ($C_{máx}$) de motores de categoria N.

Número de Pólos		4			6			8		
Faixas de potências nominais		C_P	C_{MIN}	$C_{MÁX}$	C_P	C_{MIN}	$C_{MÁX}$	C_P	C_{MIN}	$C_{MÁX}$
cv	kW	pu								
> 0,54 <= 0,63 >	> 0,40 <= 0,63	3.0	2.1	2.1	2.55	1.8	1.9	2.25	1.65	1.9
0,86 <= 1,40 >	> 0,63 <= 1,00	2.85	1.95	2.0	2.55	1.8	1.9	2.25	1.65	1.9
1,40 <= 2,20 >	> 1,00 <= 1,60	2.85	1.95	2.0	2.4	1.65	1.9	2.1	1.5	1.9
2,20 <= 3,40 >	> 1,60 <= 2,50	2.7	1.8	2.0	2.4	1.65	1.9	2.1	1.5	1.9
3,40 <= 5,40 >	> 2,50 <= 4,00	2.55	1.8	2.0	2.25	1.65	1.9	2.0	1.5	1.9
5,40 <= 8,60 >	> 4,00 <= 6,30	2.4	1.65	2.0	2.25	1.65	1.9	2.0	1.5	1.9
8,60 <= 14,00 >	> 6,30 <= 10,00	2.4	1.65	2.0	2.25	1.65	1.9	2.0	1.5	1.9
14,00 <= 22,00 >	> 10,00 <= 16,00	2.25	1.65	2.0	2.1	1.5	1.9	2.0	1.4	1.9
22,00 <= 34,00 >	> 16,00 <= 25,00	2.1	1.5	1.9	2.1	1.5	1.9	2.0	1.4	1.9
34,00 <= 54,00 >	> 25,00 <= 40,00	2.0	1.5	1.9	2.0	1.5	1.9	2.0	1.4	1.9
54,00 <= 86,00 >	> 40,00 <= 63,00	2.0	1.4	1.9	2.0	1.4	1.9	2.0	1.4	1.9
86,00 <= 140,00 >	> 63,00 <= 100,00	2.0	1.4	1.9	2.0	1.4	1.9	2.0	1.4	1.9
140,00 <= 220,00	> 100,00 <= 160,00	2.0	1.4	1.9	2.0	1.4	1.9	2.0	1.4	1.9

Tabela (1.4.1.2.2) – Conjugado com rotor bloqueado (C_p), Conjugado mínimo de partida ($C_{mín}$) e Conjugado máximo ($C_{máx}$) de motores de categoria H.

Os motores trifásicos de indução com rotor de anéis não se enquadram dentro destas categorias. Deverão ser atendidos os conjugados máximos especificados na norma da ABNT-EB 620.

1.4.1.3 *CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES WEG*

Embora os motores WEG sejam, na sua maioria, declarados como pertencendo à categoria N, a exemplo da maioria dos motores encontrados no mercados, os valores reais típicos dos conjugados excedem em muito os exigidos em norma. Na maioria dos casos excedem até mesmo, os mínimos exigidos para a categoria H. Isto significa uma curva conjugado x velocidade bastante alta, trazendo as seguintes vantagens:

- Rápida aceleração em caso de partida pesada, como bombas de pistão, esteiras carregadas, cargas de alta inércia, compressores com válvulas abertas, etc.
- Atendimentos de casos especiais, como os mencionados acima, com motores padrão de estoque, com vantagens de preço, prazo e entrega.
- Permitem o uso de sistemas de partida com tensão reduzida, como chaves estrela-triângulo, em casos normais, sem prejuízo da perfeita aceleração da carga.
- Devido ao elevado valor do conjugado máximo, enfrentam, sem perda brusca de rotação, os picos momentâneos de carga e as quedas de tensão passageiras. Isto é fundamental para o acionamento de máquinas sujeitas a grandes picos de carga, como britadores, calandras, etc.

1.4.2 *INÉRCIA DA CARGA*

O momento de inércia da carga acionada é uma das características fundamentais para verificar, através do tempo de aceleração, se o motor consegue acionar a carga dentro das condições exigidas pelo ambiente ou pela estabilidade térmica do material isolante.

Momento de inércia é uma medida da resistência que um corpo oferece a uma mudança em seu movimento de rotação em torno de um dado eixo. Depende do eixo em torno do qual ele está girando e, também, da forma do corpo e da maneira como sua massa está distribuída. A unidade do momento de inércia é kgm^2.

O momento de inércia total do sistema é a soma dos momentos de inércia da carga e do motor ($J_t = J_m + J_c$).

No caso de uma máquina que tem "rotação diferente do motor" (por exemplo, nos casos de acionamento por polias ou engrenagens), deverá ser referida a rotação nominal do motor conforme abaixo:

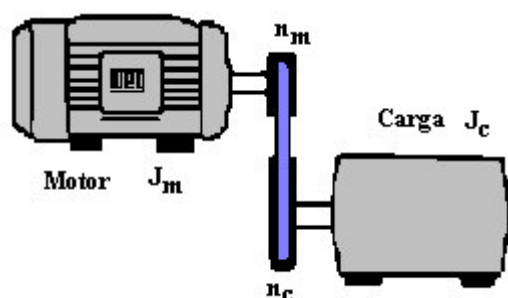



Figura 1.44 – Momento de inércia em rotações diferentes

$$J_{ce} = J_c \left(\frac{n_C}{n_N} \right)^2$$

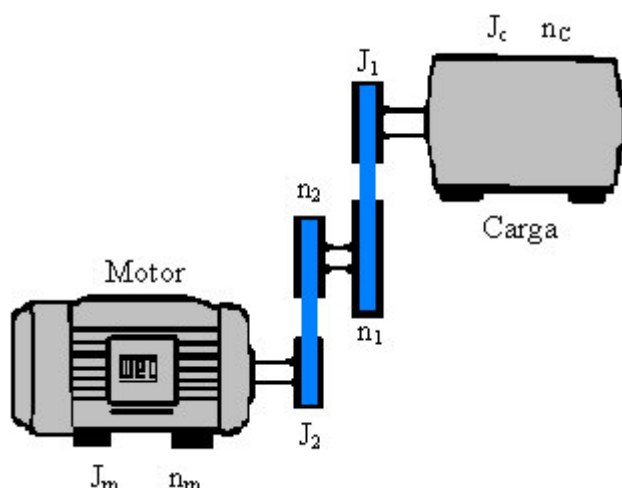



Figura 1.45 – Momento de inércia em velocidades diferentes

$$J_{ce} = J_c \left(\frac{n_C}{n_N} \right)^2 + J_1 \left(\frac{n_1}{n_N} \right)^2 + J_2 \left(\frac{n_2}{n_N} \right)^2$$

Onde: J_{ce} – Momento de inércia da carga referido ao eixo do motor;
J_c – Momento de inércia da carga;
n_C – Rotação da carga;
n_N – Rotação nominal do motor.

$$J_t = J_m + J_{ce}$$

A inércia total de uma carga é um importante fator para a determinação do tempo de aceleração.

1.4.3 *TEMPO DE ACELERAÇÃO*

Para verificar se o motor consegue acionar a carga, ou para dimensionar uma instalação, equipamento de partida ou sistema de proteção, é necessário saber o tempo de aceleração (desde o instante em que o equipamento é acionado até ser atingida a rotação nominal).

O tempo de aceleração pode ser determinado de maneira aproximada pelo conjugado médio de aceleração.

$$t_a = 2\pi . n_N . \left(\frac{J_t}{C_a} \right) = 2\pi . n_N . \left(\frac{J_m + J_{ce}}{C_{mméd} - C_{rméd}} \right)$$

Onde: t_a – tempo de aceleração em segundos;
J_t – momento de inércia total em kgm^2;
n_N – rotação nominal em rotações por segundo;
$C_{mméd}$ – conjugado médio de aceleração do motor em Nm;
$C_{rméd}$ – conjugado médio de aceleração de carga referido ao eixo em Nm;

J_m – momento de inércia do motor;
J_{ce} – momento de inércia da carga referido ao eixo;
C_a – conjugado médio de aceleração.

O conjugado médio de aceleração obtém-se a partir da diferença entre o conjugado do motor e o conjugado da carga. Seu valor deveria ser calculado para cada intervalo de rotação (a somatória dos intervalos forneceria o tempo total de aceleração). Porém, na prática, é suficiente que se calcule graficamente o conjugado médio, isto é, diferença entre a média pode ser obtida, graficamente, bastando que se observe que a soma das áreas A_1 e A_2 seja igual a área A_3 e que a área B_1 seja igual a área B_2.

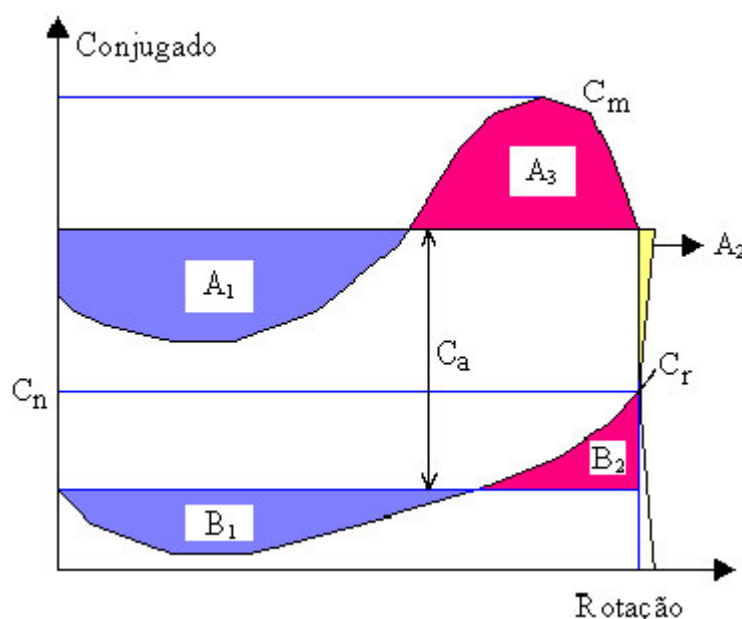



Figura 1.46 – Determinação gráfica do conjugado médio de aceleração

Onde: C_n – conjugado nominal;
C_m – conjugado do motor;
C_r – conjugado da carga;
C_a – conjugado médio de aceleração;
n_N – rotação nominal.

1.4.4 *REGIME DE PARTIDA*

Devido ao valor elevado da corrente de partida dos motores de indução, o tempo gasto na aceleração de cargas de inércia apreciável resulta na elevação rápida da temperatura do motor. Se o intervalo entre partidas sucessivas for muito reduzido, isto levará a uma aceleração de temperatura excessiva nos enrolamentos, danificando-os ou reduzindo a sua vida útil. A norma NBR 7094 estabelece um regime de partida mínimo que os motores devem ser capazes de realizar:

- Duas partidas sucessivas, sendo a primeira feita com o motor frio, isto é, com seus enrolamentos à temperatura ambiente e a segunda logo a seguir, porém, após o motor ter desacelerado até o repouso.
- Uma partida com o motor quente, ou seja, com os enrolamentos à temperatura de regime.

A primeira condição simula o caso em que a primeira partida do motor é malograda, por exemplo, pelo desligamento da proteção, permitindo-se uma segunda tentativa logo a seguir. A segunda condição simula o caso de um desligamento acidental do motor em funcionamento normal, por exemplo, por falta de energia na rede, permitindo-se retornar o funcionamento logo após o restabelecimento da energia. Como o aquecimento durante a partida depende da inércia das partes girantes da carga acionada, a norma estabelece os valores máximos de inércia da carga para os quais o motor deve ser capaz de cumprir as condições acima, os valores fixados para motores de II, IV. VI e VIII pólos estão indicados na tabela 1.4.4.1.

Potência Nominal		**Número de pólos**			
		II	**IV**	**VI**	**VIII**
cv	**kW**	**kgm²**			
0,54	0,4	0,018	0,099	0,273	0,561
0,86	0,63	0,026	0,149	0,411	0,845
1,40	1,00	0,040	0,226	0,624	1,280
2,20	1,60	0,061	0,345	0,952	1,950
3,40	2,50	0,091	0,516	1,420	2,920
5,40	4,00	0,139	0,788	2,170	4,460
8,60	6,30	0,210	1,190	3,270	6,710
14,0	10,0	0,318	1,800	4,950	10,20
22,0	18,0	0,485	2,740	7,560	15,50
34,0	25,0	0,725	4,100	11,30	23,20
54,0	40,0	1,110	6,260	17,20	35,40
86,0	63,0	1,670	9,420	26,00	53,30
140	100	2,520	14,30	39,30	80,80
220	160	3,850	21,80	60,10	123,0
340	250	5,760	32,60	89,70	184,0
540	400	8,790	49,70	137,0	281,0
860	630	13,20	74,80	206,0	423,0

Tabela 1.4.4.1 – Momento de inércia (J)

Notas:

- Os valores são dados em função de massa-raio ao quadrado. Eles foram calculados a partir da fórmula:

$$J = 0{,}04 \times P^{0{,}9} \times p^{2{,}5}$$

Onde: P – potência nominal em kW;
p – número de pares de pólos.

- Para valores intermediários de potência nominal, o momento de inércia externo, deve ser calculado pela fórmula da nota acima.

Para cargas com inércias maior que o valor de referência da tabela 1.4.4.1, o que pode ocorrer, principalmente nas potências maiores ou para determinação do número de partidas permitidas por hora, deverá ser consultada a nossa engenharia de aplicação, indicando os seguintes dados da aplicação:

- Potência requerida pela carga. Se o regime for intermitente, ver o último item: " regime de funcionamento";
- Rotação da máquina acionada;
- Transmissão: direta, correia plana, correias "V", corrente, etc.;

  - Relação de transmissão com croquis das dimensões e distâncias das polias, se for transmissão por correia.
  - Cargas radiais anormais aplicadas à ponta do eixo: tração da correia em transmissões especiais, peças pesadas, presas ao eixo, etc.
  - Cargas axiais aplicadas à ponta do eixo: transmissões por engrenagem heliocoidal, empuxos hidráulicos de bombas, peças rotativas pesadas em montagem vertical, etc.

- Forma construtivas se não for B3D, indicar o código da forma construtiva utilizada;

- Conjugados de partida e máximos necessários:

  - Descrição do equipamento acionado e condições de utilização;
  - Momento de inércia ou GD^2 das partes móveis do equipamento, e a rotação a que está referida.

- Regime de funcionamento, não se tratando de regime contínuo, descrever detalhadamente o período típico de regime, não esquecendo de especificar:

  - Potência requerida e duração de cada período com carga;
  - Duração dos períodos sem carga (motor em vazio ou motor desligado);
  - Reversões do sentido de rotação;
  - Frenagem em contra-corrente.

1.4.5 *CORRENTE DE ROTOR BLOQUEADO*

1.4.5.1 *VALORES MÁXIMOS NORMALIZADOS*

Os limites máximos da corrente com rotor bloqueado, em função da potência nominal do motor é válido para qualquer número de pólos, estão indicados na tabela 1.4.5.1.1, expressos em termos da potência aparente absorvida com rotor bloqueado em relação à potência nominal, kva/cv ou kva/kW.

$$\frac{kva}{cv} = \frac{\text{potência aparente com rotor bloqueado}}{\text{potência nominal}}$$

$$\frac{kva}{cv} = \frac{\sqrt{3}.I_p.U}{P(cv) \times 1000}; \qquad \frac{kva}{kW} = \frac{\sqrt{3}.I_p.U}{P(kW) \times 1000}$$

Sendo: I_p – Corrente de rotor bloqueado, ou corrente de partida;
U – Tensão nominal (V);
P – Potência nominal (cv ou kW).

Faixa de potências nominais		S_p / S_n	
Cv	**kW**	**kva/cv**	**kva/kW**
$>0,54 \leq 8,6$	$>0,4 \leq 6,3$	9,6	13
$>8,6 \leq 34,0$	$>6,3 \leq 25$	8,8	12
$>34,0 \leq 140$	$>25 \leq 63$	8,1	11
$>140 \leq 860$	$>63 \leq 630$	7,4	10

Tabela 1.4.5.1.1 – Potência aparente com rotor bloqueado (S_p/S_n) para motores trifásicos

1.4.5.2 *INDICAÇÃO DA CORRENTE*

A indicação do valor da corrente de rotor bloqueado na placa de identificação do motor é prescrita na norma NBR 7094, de maneira mais direta que na norma antiga EB-120. De acordo com a EB-120, a placa mostrava uma letra código padronizada que dava a indicação da faixa de valores kva/cv em que se situava a corrente de rotor bloqueado do motor. Os valores correspondentes a essas letras do código de partida, são mostrados na tabela 1.4.5.2.1. Pela norma NBR 7094, indica-se diretamente o valor de I_p/I_n que é a relação entre a corrente de rotor bloqueado e a corrente nominal.

Código de partida

$$\frac{kva}{cv} = \frac{\frac{I_p}{I_n} \times 0,736}{\eta \times \cos\varphi}$$

Código	kva/cv
A	0 - 3,14
B	3,15 – 3,54
C	3,55 – 3,99
D	4,0 – 4,49
E	4,5 – 4,99
F	5,0 – 5,59
G	5,6 – 6,29
H	6,3 – 7,09
J	7,1 – 7,99

Código	kva/cv
K	8,0 – 8,99
L	9,0 – 9,99
M	10,0 – 11,19
N	11,2 – 12,49
P	12,5 – 13,99
R	14,0 – 15,99
S	16,0 – 17,99
T	18,0 – 19,99
U	20,0 – 22,99
V	22,4 ou mais

Tabela 1.4.5.2.1 – Código de partida

1.5 REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DE MOTORES ASSÍNCRONOS DE INDUÇÃO

1.5.1 *INTRODUÇÃO*

A relação entre velocidade, freqüência, número de pólos e escorregamento é expressa por:

$$n = \frac{2}{p} \times f \times 60 \times (1 - s)$$

Onde: n – rotação (rpm);
f – freqüência (hertz);
p – número de pólos;
s – escorregamento.

Analisando a fórmula, pode-se perceber que para regular a velocidade de um motor assíncrono, pode-se atuar nos seguintes parâmetros:

- p – número de pólos;
- s – escorregamento;
- f – freqüência da tensão (Hz).

1.5.2 *VARIAÇÃO DE NÚMEROS DE PÓLOS*

Existem três modos de variar o número de pólos de um motor assíncrono, que são:

- Enrolamentos separados no estator;
- Um enrolamento com comutação de pólos;
- Combinação dos dois anteriores.

Em todos esses casos, a regulação de velocidade será discreta, sem perdas, porém, a carcaça será maior do que a de um motor de velocidade única.

1.5.2.1 *MOTORES DE DUAS VELOCIDADES EM ENROLAMENTOS SEPARADOS*

Esta versão apresenta a vantagem de se combinar enrolamentos com qualquer número de pólos, porém, limitada pelo dimensionamento eletromagnético do núcleo (estator/rotor) e carcaça geralmente bem maior que o de velocidade única.

1.5.2.2 MOTORES DE DUAS VELOCIDADES COM ENROLAMENTOS POR COMUTAÇÃO DE PÓLOS

O sistema mais comum que se apresenta é o denominado “ligação Dahlander”. Esta ligação implica numa relação de pólos de 1:2 com conseqüente relação de rotação de 1:2.
Podem ser ligadas da seguinte forma:

- ***Conjugado constante:***

O conjugado nas duas rotações é constante e a relação de potência é da ordem de 0,63:1. Neste caso o motor tem uma ligação de Δ/YY.

Exemplo: Motor 0,63/1 cv – IV/II pólos - Δ/YY.

Este caso se presta as aplicações cuja curva de torque da carga permanece constante com a rotação.

- ***Potência constante:***

Neste caso, a relação de conjugado é 1:2 e a potência permanece constante. O motor possui uma ligação YY/Δ.

Exemplo: 10/10 cv – IV/II pólos – YY/Δ.

- ***Conjugado variável***

Neste caso, a relação de potência será de aproximadamente 1:4. É muito aplicado às cargas como bombas, ventiladores.
Sua ligação é Y/YY.

Exemplo: 1/4 cv – IV-II pólos – Y/YY.

1.5.2.3 MOTORES COM MAIS DE DUAS VELOCIDADES

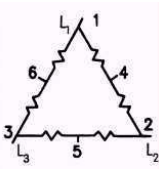
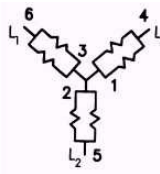
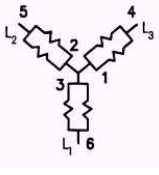
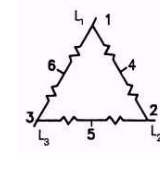
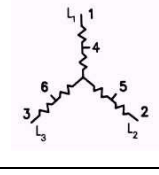
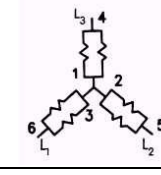
É possível combinar um enrolamento Dahlander com um enrolamento simples ou mais. Entretanto, não é comum, e somente utilizado em aplicações especiais.

ROTAÇÃO		
TIPO	BAIXA	ALTA
Conjugado Constante		
Potência Constante		
Conjugado Variável		

Figura 1.47 – Resumo das ligações Dahlander

1.5.3 *VARIAÇÃO DO ESCORREGAMENTO*

Neste caso, a velocidade do campo girante é mantida constante, e a velocidade do rotor é alterada de acordo com as condições exigidas pela carga, que podem ser:

- Variação da resistência rotórica;
- Variação da tensão do estator;
- Variação de ambas, simultaneamente.

Estas variações são conseguidas através do aumento das perdas rotóricas, o que limita a utilização desse sistema.

1.5.3.1 *VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA ROTÓRICA*

Utilizado em motores de anéis. Baseia-se na seguinte equação:

$$s = \frac{3 \times R_2 \times I_2^2}{\omega_0 \times T} = \frac{p_{j2}}{\omega_0 \times T}$$

Onde: p_{j2} – perdas rotóricas (W);
ω_0 – rotação síncrona em rad/s;
T – torque ou conjugado do rotor;
R_2 – resistência rotórica (ohms);
I_2 – corrente rotórica (A).

A inserção de uma resistência externa no rotor faz com que o motor aumente o escorregamento (s), provocando a variação de velocidade. Na figura a seguir, vê-se o efeito do aumento do R_2.

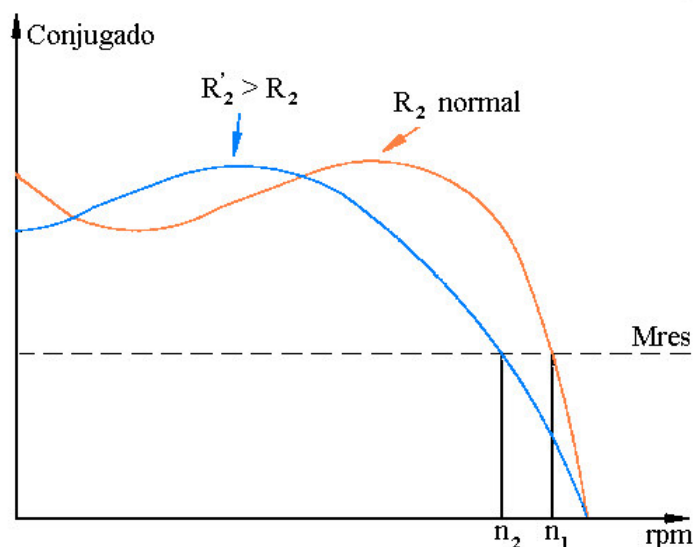



Figura 1.48 – Curva de conjugado com variação da resistência rotórica

1.5.3.2 *VARIAÇÃO DA TENSÃO DO ESTATOR*

É um sistema pouco utilizado, uma vez que também gera perdas rotóricas e a faixa de variação de velocidade é pequena.

1.5.4 *VARIAÇÃO DA FREQÜÊNCIA*

Ao se variar a freqüência da tensão do estator, está se variando a velocidade do campo girante. Com isso pode-se variar a velocidade do rotor, mantendo-se constante o escorregamento da máquina e, portanto, as perdas podem ser otimizadas de acordo com as condições da carga.

Ao se variar a freqüência de alimentação do motor CA, varia-se sua velocidade síncrona, o que significa que todas as velocidades síncronas variam desde $f \cong 0$ até a máxima freqüência do conversor. O comportamento do motor, que corresponde a sua curva conjugado x velocidade, permanece da mesma forma, entretanto deslocada na rotação conforme a freqüência, como mostra a figura 1.49.

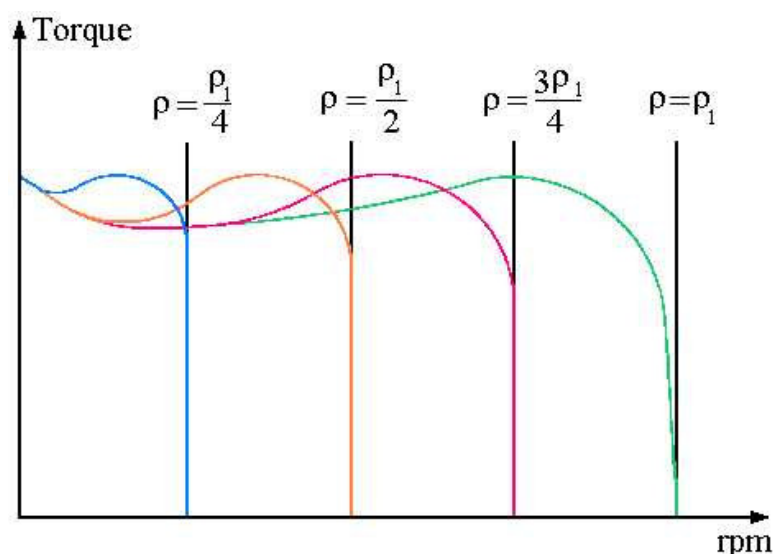



Figura 1.49 – Exemplo de curva de conjugado com tensão proporcional a freqüência

Teoricamente, existem duas faixas de atuação: uma com fluxo constante, até a freqüência nominal, e outra com enfraquecimento de campo, correspondente àquela acima da freqüência nominal, ou seja:

$$f \cong 0Hz \text{ até } f_n \rightarrow \frac{U}{f} = \text{constante = fluxo constante;}$$

$$f > f_n \rightarrow \text{U = constante = enfraquecimento de campo.}$$

Entretanto, na realidade, para que essa duas faixas se tornem possíveis de serem realizadas, há necessidade das seguintes considerações:

- Se um motor auto-ventilado trabalha com velocidade menor do que a nominal, terá sua capacidade de refrigeração diminuída.
- A tensão de saída dos conversores apresenta uma forma não perfeitamente senoidal, o que implica em harmônicas de ordem superior, que provocam um aumento de perdas no motor.

Devido a isto, é necessário reduzir conjugado e potência admissíveis no motor. aconselha-se normalmente seguir a seguinte curva:

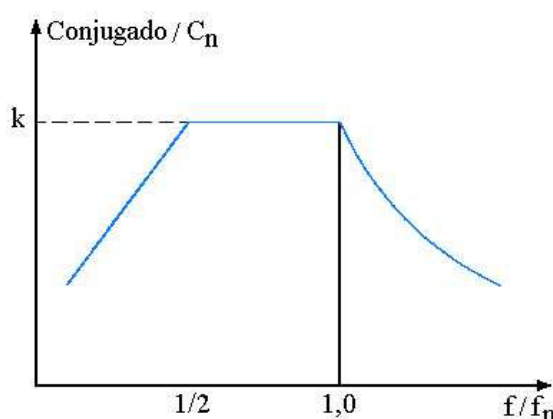



Figura 1.50 – curva de torque x freqüência para uso de motor com conversor de freqüência

Onde k está de 0,7 à 1,0 e depende do conteúdo de harmônicas do conversor. Valores típicos são 0,8 à 0,9.

1.5.4.1 *CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DE MOTORES COM CONTROLE DE VELOCIDADE ATRAVÉS DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA*

a) Operação em rotações abaixo da rotação obtida com a freqüência nominal f_n. Geralmente até 50% da fn utiliza-se o fator k (figura 1.48) de redutor de potência ou se quiser, pode-se utilizar o fator de serviço e/ou o aumento da classe de isolamento para manter o torque constante. Abaixo de 50% da freqüência nominal, para manter-se o torque constante, geralmente deve-se aumentar a relação U/f do conversor.

b) Operação em rotações acima da rotação obtida com a freqüência nominal f_n. Neste caso, como o motor funcionará com enfraquecimento de campo, a máxima velocidade estará limitada pelo torque máximo do motor e pela máxima velocidade periférica das partes girantes do motor (ventilador, rotor mancais).

c) Rendimento: como a tensão de alimentação não é senoidal, haverá harmônicas que provocarão maiores perdas e conseqüente redução do rendimento.

d) Ruído: variará sensivelmente em função da frequência e do conteúdo de harmônicas do conversor.

e) Operação em áreas explosivas: ***ATENÇÂO: motores operando com conversores de freqüência em áreas com atmosferas explosivas, necessitam ser dimensionados de comum acordo entre fabricante e cliente e, a especificação exata do seu funcionamento deverá estar descrita na placa de identificação do motor.***

1.6 CARACTERÍSTICA EM REGIME

1.6.1 *ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA, CLASSE DE ISOLAMENTO*

1.6.1.1 *AQUECIMENTO DO ENROLAMENTO*

- ***Perdas:***

A potência útil fornecida pelo motor na ponta do eixo é menor que a potência que o motor absorve da linha de alimentação, isto é, o rendimento do motor é sempre inferior a 100%. A diferença entre as duas potências representa as perdas, que são transformadas em calor, o qual aquece o enrolamento e deve ser dissipado para fora do motor, para evitar que a elevação de temperatura seja excessiva. O mesmo acontece em todos os tipos de motores. No motor de automóvel, por exemplo, o calor gerado pelas perdas internas tem que ser retirado do bloco pelo sistema de circulação de água com radiador ou pela ventoinha, em motores resfriados a ar.

- ***Dissipação de calor:***

O calor gerado pelas perdas no interior do motor é dissipado para o ar ambiente através da superfície externa da carcaça. Em motores fechados essa dissipação é normalmente auxiliada pelo ventilador montado no próprio eixo do motor. Uma boa dissipação depende:

- Da eficiência do sistema de ventilação;
- Da área total de dissipação da carcaça;
- Da diferença de temperatura entre a superfície externa da carcaça e do ar ambiente ($t_{ext} - t_a$).

a) O sistema de ventilação bem projetado, além de ter um ventilador eficiente, capaz de movimentar grande volume de ar; deve dirigir esse ar de modo a “varrer” toda a superfície da carcaça, onde se dá a troca de calor. De nada adianta um grande volume de ar se ele se espalha sem retirar o calor do motor.

b) A área total de dissipação deve ser a maior possível. Entretanto, um motor com uma carcaça muito grande, (para obter maior área) seria muito caro e pesado, além de ocupar muito espaço. Por isso, a área de dissipação disponível é limitada pela necessidade de fabricar motores pequenos e leves. Isso é compensado em parte, aumentando-se a área disponível por meio de aletas de resfriamento, fundidas com a carcaça.

c) Um sistema de resfriamento eficiente é aquele que consegue dissipar a maior quantidade de calor disponível, através da menor área de dissipação. Para isso, é necessário que a queda interna de temperatura, mostrada na figura 1.51, vale a soma da queda interna com a queda externa.

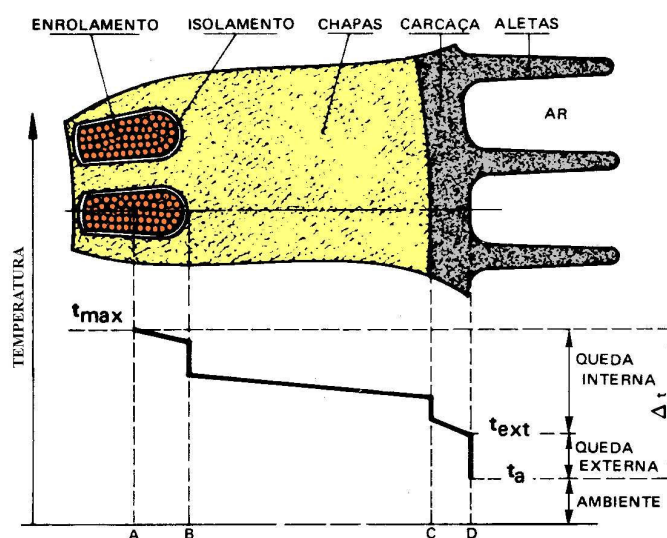



Figura 1.51

Como visto anteriormente, interessa reduzir a queda interna (melhorar a transferência de calor) para poder ter uma queda externa a maior possível, pois esta é que realmente ajuda a dissipar o calor. A queda interna de temperatura depende de diversos fatores como indica a figura 1.51, onde as temperaturas de certos pontos importantes do motor estão representadas e explicadas a seguir:

A – Ponto mais quente do enrolamento, no interior da ranhura, onde é gerado o calor proveniente das perdas nos condutores.

AB – Queda de temperatura na transferência de calor do ponto mais quente até os fios externos. Como o ar é um péssimo condutor de calor, é importante que não haja "vazios" no interior da ranhura, isto é, as bobinas devem ser compactas e a impregnação com verniz deve ser perfeita.

B – Queda através do isolamento da ranhura e no contato deste com os condutores de um lado, e com as chapas do núcleo, do outro. O emprego de materiais modernos melhora a transmissão de calor através do isolante; a impregnação perfeita, melhora o contato do lado interno, eliminando espaços vazios; o bom alinhamento das chapas estampadas, melhora o contato do lado externo, eliminando camadas de ar que prejudicam a transferência de calor.

BC – Queda de temperatura por transmissão através do material das chapas do núcleo.

C – Queda no contato entre o núcleo e a carcaça. A condução de calor será tanto melhor quanto mais perfeito for o contato entre as partes, dependendo do bom alinhamento das chapas, e precisão da usinagem da carcaça. Superfícies irregulares deixam espaços vazios entre elas, resultando mau contato e, portanto, má condução do calor e elevada queda de temperatura neste ponto.

CD – Queda de temperatura por transmissão através da espessura da carcaça.

Graças a um projeto moderno, uso de materiais avançados, processos de fabricação aprimorados, sob um permanente Controle de Qualidade, os motores WEG apresentam uma excelente transferência de calor do interior para a superfície, eliminando "pontos quentes" no enrolamento.

- Temperatura externa do motor:

Era comum, antigamente, verificar o aquecimento do motor, medindo, com a mão, a temperatura externa da carcaça. Em motores modernos, este método primitivo é completamente errado. Como viu-se anteriormente, os critérios modernos de projeto, procuram aprimorar a transmissão de calor internamente, de modo que a temperatura do enrolamento fique pouco acima da temperatura externa da carcaça, onde ela realmente contribui para dissipar as perdas. Em resumo, a temperatura da carcaça não dá indicação do aquecimento interno do motor, nem de sua qualidade. Um motor frio por fora pode ter perdas maiores e temperatura mais alta no enrolamento do que um motor exteriormente quente.

1.6.1.2 *VIDA ÚTIL DO MOTOR DE INDUÇÃO*

Sendo o motor de indução, uma máquina robusta e de construção simples, a sua vida útil depende quase exclusivamente da vida útil da isolação dos enrolamentos. Esta é afetada por muitos fatores, como umidade, vibrações, ambientes corrosivos e outros. Dentre todos os fatores, o mais importante é, sem dúvida a temperatura de trabalho dos materiais isolantes empregados. Um aumento de 8 a 10 graus na temperatura da isolação reduz sua vida útil pela metade.

Quando fala-se em diminuição da vida útil do motor, não se refere às temperaturas elevadas, quando o isolante se queima e o enrolamento é destruído de repente. Vida útil da isolação (em termos de temperatura de trabalho, bem abaixo daquela em que o material se queima), refere-se ao envelhecimento gradual do isolante, que vai se tornando ressecado, perdendo o poder isolante, até que não suporte mais a tensão aplicada e produza o curto-circuito.

A experiência mostra que a isolação tem uma duração praticamente ilimitada, se a sua temperatura for mantida abaixo de um certo limite. Acima deste valor, a vida útil da isolação vai se tornado cada vez mais curta, à medida que a temperatura de trabalho é mais alta. Este limite de temperatura é muito mais baixo que a temperatura de "queima" do isolante e depende do tipo de material empregado.

Esta limitação de temperatura refere-se ao ponto mais quente da isolação e não necessariamente ao enrolamento todo. Evidentemente, basta um ponto fraco no interior da bobina para que o enrolamento fique inutilizado.

1.6.1.2.1 *VIDA ÚTIL DE UMA MÁQUINA CC*

Da mesma forma que o motor de indução a vida útil de uma máquina CC é determinada pelo material isolante, isto se não considerarmos as peças que se desgastam devido ao uso, como escovas e rolamentos.

1.6.1.3 *CLASSES DE ISOLAMENTO*

Como visto acima, o limite de temperatura depende do tipo de material empregado. Para fins de normalização, os materiais isolantes e os sistemas de isolamento (cada um formado pela combinação de vários materiais) são agrupados em CLASSES DE ISOLAMENTO, cada qual definida pelo respectivo limite de temperatura, ou seja, pela maior temperatura que o material pode suportar continuamente sem que seja afetada sua vida útil.

As classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura conforme NBR 7094, são as seguintes:

- Classe A (105°C);
- Classe E (120°C);
- Classe B (130°C);
- Classe F (155°C);
- Classe H (180°C).

As classes B e F são as comumente utilizadas em motores normais.

1.6.1.4 *MEDIDA DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DO ENROLAMENTO*

É muito difícil medir a temperatura do enrolamento com termômetros ou termopares, pois a temperatura varia de um ponto a outro e nunca se sabe se o ponto da medição está próximo do ponto mais quente. O método mais seguro e mais confiável de se medir a temperatura de um enrolamento é através da variação de sua resistência ôhmica com a temperatura, que aproveita a propriedade dos condutores de variar sua resistência, segundo uma lei conhecida. A elevação da temperatura pelo método da resistência, é calculada por meio da seguinte fórmula, para condutores de cobre:

$$\Delta t = t_2 - t_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times (235 + t_1) + t_1 - t_a$$

Onde:
Δt – é a elevação de temperatura;
t_1 – temperatura do enrolamento antes do ensaio, praticamente igual a do meio refrigerante, medida por termômetro;
t_2 – temperatura dos enrolamentos no fim do ensaio;
t_a – temperatura do meio refrigerante no fim do ensaio;
R_1 – resistência do enrolamento antes do ensaio;
R_2 – resistência do enrolamento no fim do ensaio.

1.6.1.5 *APLICAÇÃO A MOTORES ELÉTRICOS*

A temperatura do ponto mais quente do enrolamento deve ser mantida abaixo do limite da classe. A temperatura total vale a soma da temperatura ambiente com a elevação de temperatura Δt mais a diferença que existe entre a temperatura média do enrolamento e a do

ponto mais quente. As normas de motores fixam a máxima elevação de temperatura Δt, de modo que a temperatura do ponto mais quente fica limitada, baseada nas seguintes considerações:

- A temperatura ambiente é, no máximo 40°C, por norma, e a cima disso as condições de trabalho são consideradas especiais;
- A diferença entre a temperatura média e a do ponto mais quente, não varia muito de motor para motor e seu valor estabelecido em norma, baseado na prática é 5°C, para as classes A e E, 10°C para a classe B e 15°C para as classes F e H.

As normas de motores, portanto, estabelecem um máximo para a temperatura ambiente e especificam uma elevação de temperatura máxima para cada classe de isolamento. Deste modo, fica indiretamente limitada a temperatura do ponto mais quente do motor. Os valores numéricos e a composição da temperatura admissível do ponto mais quente, são indicados na tabela 1.6.1.5.1.

Classe de Isolamento		**A**	**E**	**B**	**F**	**H**
Temperatura Ambiente	ºC	40	40	40	40	40
Δt – elevação de temperatura (método da resistência)	K	60	75	80	105	125
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média	ºC	5	5	10	10	15
Total: temperatura do ponto mais quente	ºC	105	120	130	155	180

Tabela 1.6.1.5.1 – Composição da temperatura em função da classe de isolamento

Para motores de construção naval, deverão ser obedecidos todos os detalhes particulares de cada entidade classificadora.

Entidades classificadoras para uso naval	**Máxima temperatura ambiente ºC t_a**	**Máxima sobreelevação de temperatura permitida por classe de isolamento, Δt em ºC (método de variação de resistência)**			
		A	**E**	**B**	**F**
Germanischer Lloyd	45	55	70	75	96
American Bureau of Shipping	50	55	65	75	95
Bureau Véritas	50	50	65	70	90
Norske Véritas	45	50	65	70	90
Lloyds Register of Shipping	45	50	65	70	90
RINa	45	50	70	75	---

Tabela 1.6.1.5.2

1.6.2 PROTEÇÃO TÉRMICA DE MOTORES ELÉTRICOS

A proteção térmica é efetuada por meio de termo-resistências (resistência calibrada), termistores, termostatos ou protetores térmicos. Os tipos de detetores a serem utilizados são determinados em função da classe de temperatura do isolamento empregado, de cada tipo de máquina e da exigência do cliente.

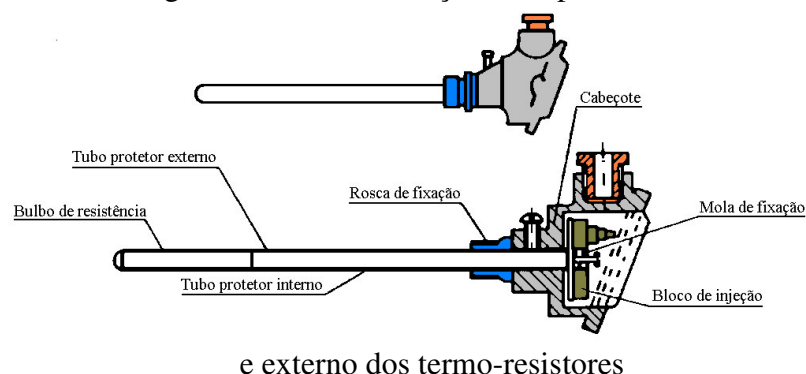
Tipos de protetores utilizados pela WEG:

1.6.2.1 TERMO-RESISTÊNCIA (PT-100)

São elementos onde sua operação é baseada na característica de variação da resistência com a temperatura intrínseca a alguns materiais (geralmente platina, níquel ou cobre). Possuem resistência calibrada, que varia linearmente com a temperatura, possibilitando um acompanhamento contínuo do processo de aquecimento do motor pelo display do controlador, com alto grau de precisão e sensibilidade de resposta. Sua aplicação é ampla nos diversos setores de técnicas de medição e automatização de temperatura nas indústrias em geral. Geralmente, aplica-se em instalações de grande responsabilidade como, por exemplo, em regime intermitente muito irregular. Um mesmo detetor pode servir para alarme e para desligamento.

Desvantagem: os elementos sensores e o circuitos de controle possuem alto custo.

Figura 1.52 – Visualização do aspecto interno

e externo dos termo-resistores

1.6.2.2 TERMISTORES (PTC E NTC)

São detetores térmicos compostos de sensores semicondutores que variam sua resistência bruscamente ao atingirem uma determinada temperatura.

- PTC – coeficiente de temperatura positivo;
- NTC – coeficiente de temperatura negativo.

O tipo "PTC" é um termistor cuja resistência aumenta bruscamente para um valor bem definido de temperatura, especificado para cada tipo. Essa variação brusca na resistência interrompe a corrente no PTC, acionando um relé de saída, o qual desliga o circuito principal. Também pode ser utilizado para sistemas de alarme ou alarme e desligamento (2 por fase). Para o termistor "NTC" acontece o contrário do PTC, porém, sua aplicação não é normal em motores elétricos, pois os circuitos eletrônicos de controle disponíveis, geralmente são para o PTC.

Os termistores possuem tamanho reduzido, não sofrem desgastes mecânicos e têm uma resposta mais rápida em relação aos outros detetores, embora permitam um acompanhamento contínuo do processo de aquecimento do motor. os termistores com seus respectivos circuitos eletrônicos de controle oferecem proteção completa contra sobreaquecimento produzido por falta de fase, sobrecarga, sob ou sobretensões ou freqüentes operações de reversão ou liga-desliga. Possuem um baixo custo, relativamente ao do tipo PT-100, porém, necessitam de relé para comando da atuação do alarme ou operação.

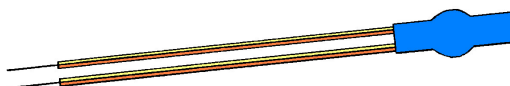



Figura 1.53 – Visualização do aspecto externo dos termistores

1.6.2.3 *TERMOSTATOS*

São detetores térmicos do tipo bimetálico com contatos de prata normalmente fechados, que se abrem quando ocorre determinada elevação de temperatura. Quando a temperatura de atuação do bimetálico diminuir, este volta a sua forma original instantaneamente permitindo o fechamento dos contatos novamente.

Os termostatos podem ser destinados para sistemas de alarme, desligamento ou ambos (alarme e desligamento) de motores elétricos trifásicos, quando solicitado pelo cliente. São ligados em série com a bobina do contator. Dependendo do grau de segurança e da especificação do cliente, podem ser utilizados três termostatos (um por fase) ou seis termostatos (grupo de dois por fase).

Para operar em alarme e desligamento (dois termostatos por fase), os termostatos de alarme devem ser apropriados para atuação na elevação de temperatura prevista do motor, enquanto que os termostatos de desligamento deverão atuar na temperatura máxima do material isolante.

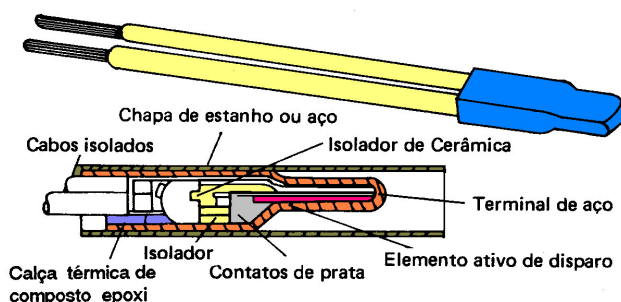



Figura 1.54 – Visualização do aspecto interno e externo do termostato

Os termostatos também são utilizados em aplicações especiais de motores monofásicos. Nestas aplicações, os termostato pode ser ligado em série com a alimentação do motor, desde que a corrente do motor não ultrapasse a máxima corrente admissível do termostato. Caso isto ocorra, liga-se o termostato em série com a bobina do contator. Os termostatos são instalados nas cabeças de bobinas de fases diferentes.

1.6.2.4 *PROTETORES TÉRMICOS*

São do tipo bimetálico com contatos normalmente fechados. Utilizados, principalmente, para proteção contra sobreaquecimento em motores de indução monofásicos, provocado por sobrecargas, travamento do rotor, quedas de tensão, etc. São aplicados quando especificados pelo cliente. O protetor térmico consiste basicamente em um disco bimetálico que possui dois contatos móveis, uma resistência e um par de contatos fixos.

O protetor é ligado em série com a alimentação e, devido à dissipação térmica causada pela passagem da corrente através da resistência interna deste, ocorre uma deformação do disco, tal que, os contatos se abrem e a alimentação do motor é interrompida. Após ser atingida uma temperatura inferior à especificada, o protetor deve religar. Em função de religamento, pode haver dois tipos de protetores:

- Protetor com religamento automático, onde o rearme é realizado automaticamente ;
- Protetor com religamento manual, onde o rearme é realizado através de um dispositivo manual.

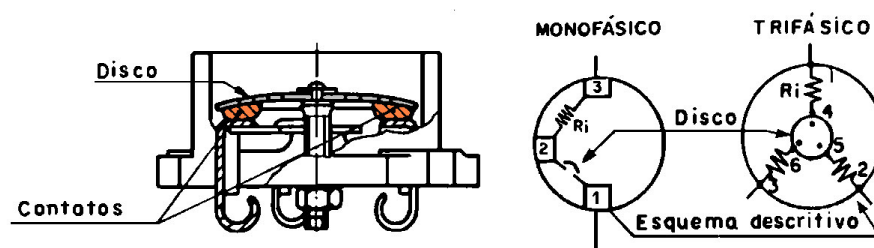



Figura 1.55 – Visualização do aspecto interno do protetor térmico

O protetor térmico também tem aplicação em motores trifásicos, porém, apenas em motores com ligação Y. O seguinte esquema de ligação poderá ser utilizado:

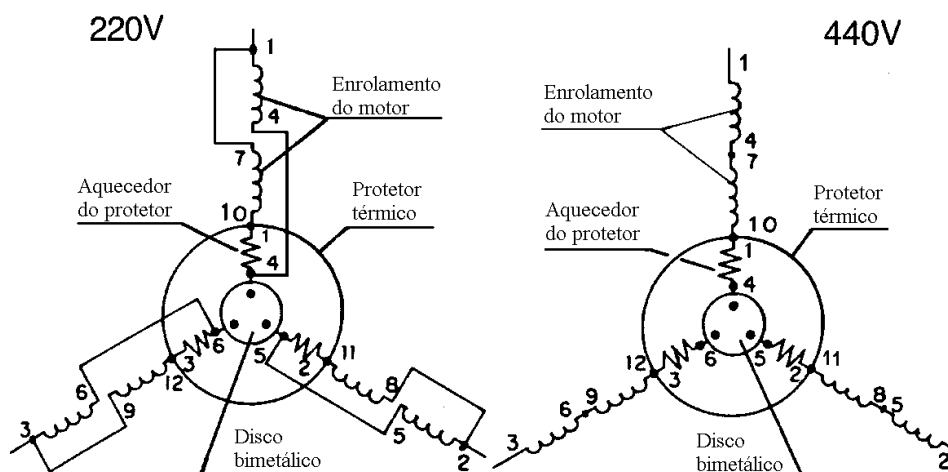



Figura 1.56 – Esquema de ligação do protetor térmico para motores trifásicos

Vantagens:

- Combinação de protetor sensível à corrente e a temperatura;
- Possibilidade de religamento automático.

Desvantagens:

- Limitação da corrente, por estar o protetor ligado diretamente à bobina do motor monofásico;
- Aplicação voltada para motores trifásicos somente no centro da ligação Y.

	Termoresistor (PT100)	***Termistor (PTC e NTC)***	***Termostato***	***Protetor Térmico***
Mecanismo de proteção	Resistência calibrada	Resistor de avalanche	- Contatos móveis - Bimetálicos	Contatos móveis
Disposição	Cabeça de bobina	Cabeça de bobina	- Inserido no circuito - Cabeça de bobina	Inserido no circuito
Forma de atuação	Comando externo de atuação na proteção	Comando externo de atuação na proteção	- Atuação direta - Comando externo de atuação na proteção	Atuação direta
Limitação de corrente	Corrente de comando	Corrente de comando	- Corrente do motor - Corrente do comando	Corrente do motor
Tipo de sensibilidade	Temperatura	Temperatura	- Corrente e temperatura	Corrente e temperatura
Número de unidades por motor	3 ou 6	3 ou 6	3 ou 6 1 ou 3	1
Tipos de comando	Alarme e/ou desligamento	Alarme e/ou desligamento	- Desligamento - Alarme e/ou desligamento	Desligamento

Tabela 1.6.2 – Comparativa entre os sistemas de proteção mais comuns

1.6.3 *REGULAÇÃO DA POTÊNCIA PARA A ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DA CLASSE B EM MOTORES CC*

Em muitos casos é exigida uma elevação de temperatura inferior ao da classe, como por exemplo classe F com elevação B.

O motor poderá ser escolhido pelo catálogo, com a seguinte redução da potência nele especificada, que é referente à classe F:

DC(N)F,DC(N)D, DC(N)X, DC(N)W, DC(N)A	***20%***
DC(N)E	***30%***

1.6.4 *REGIME DE SERVIÇO*

É o grau de regularidade da carga a que o motor é submetido. Os motores normais são projetados para regime contínuo, (a carga é constante), por tempo indefinido, e igual a potência nominal do motor. A indicação do regime do motor deve ser feita pelo comprador, da forma mais exata possível. Nos casos em que a carga não varia ou nos quais varia de forma previsível, o regime poderá ser indicado numericamente ou por meio de gráficos que representam a variação em função do tempo das grandezas variáveis. Quando a seqüência real dos valores no tempo for indeterminada, deverá ser indicada uma seqüência fictícia não menos severa que a real.

1.6.4.1 *REGIMES DE SERVIÇOS PADRONIZADOS*

Os regimes tipo e os símbolos alfa-numéricos a eles atribuídos, são indicados a seguir:

a) Regime Contínuo (S1):

O funcionamento da carga constante de duração suficiente para que se alcance o equilíbrio térmico (figura 1.57).

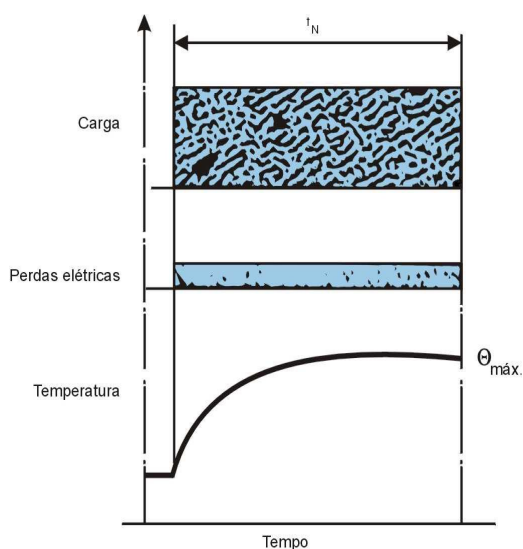



Figura 1.57

Onde: t_N – funcionamento em carga constante;
$\Theta_{máx}$ – temperatura máxima atingida.

b) Regime de Tempo Limitado (S2):

O funcionamento da carga é constante e, durante um certo tempo, inferior ao necessário para atingir o equilíbrio térmico, seguido de um período de repouso de duração suficiente para restabelecer a igualdade de temperatura com o meio refrigerante (figura 1.58).

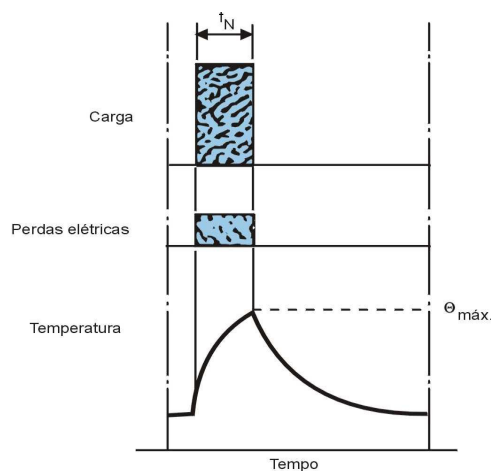



Figura 1.58

Onde: t_N – funcionamento em carga constante;
$\Theta_{máx}$ – temperatura máxima atingida.

c) Regime Intermitente periódico (S3):

A seqüência de ciclos idênticos, cada qual incluindo um período de funcionamento a carga constante e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico durante um ciclo de regime e no qual a corrente de partida não afete de modo significativo a elevação de temperatura (figura 1.59).

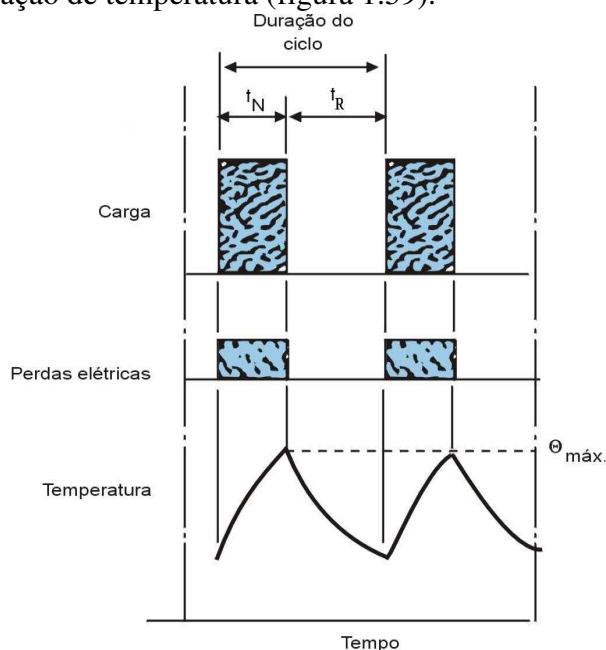



Figura 1.59

Onde: t_N – funcionamento em carga constante;
t_R – repouso;
$\Theta_{máx}$ – temperatura máxima atingida.

$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{t_N}{t_N + t_R} \times 100\%$$

d) Regime Intermitente Periódico com Partidas (S4):

Este regime tem uma seqüência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, um período de funcionamento a carga constante e um período de repouso, sendo tais períodos muitos curtos, para que se atinja o equilíbrio térmico (figura 1.60).

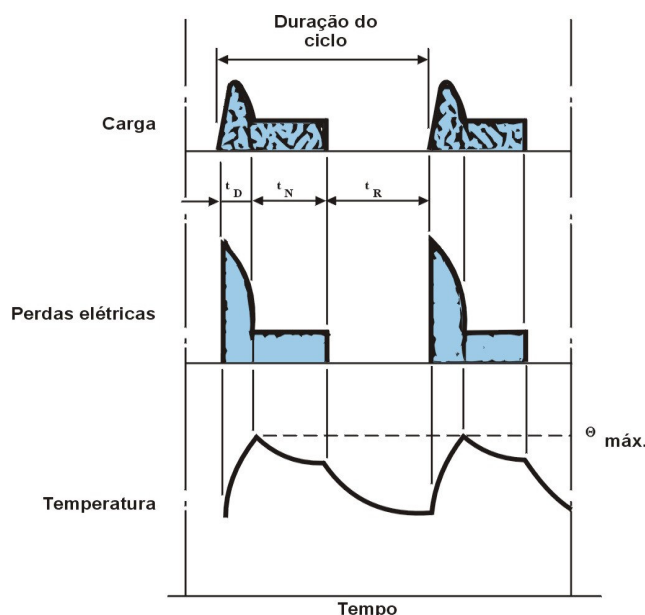



Figura 1.60

Onde: t_D – partida;
t_N – funcionamento em carga constante;
t_R – repouso;
$\Theta_{máx}$ – temperatura máxima atingida.

$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{t_D + t_N}{t_N + t_R + t_D} \times 100\%$$

e) Regime Intermitente Periódico com frenagem elétrica (S5):

A seqüência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, um período de funcionamento a carga constante, um período de frenagem elétrica e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico (figura 1.61).

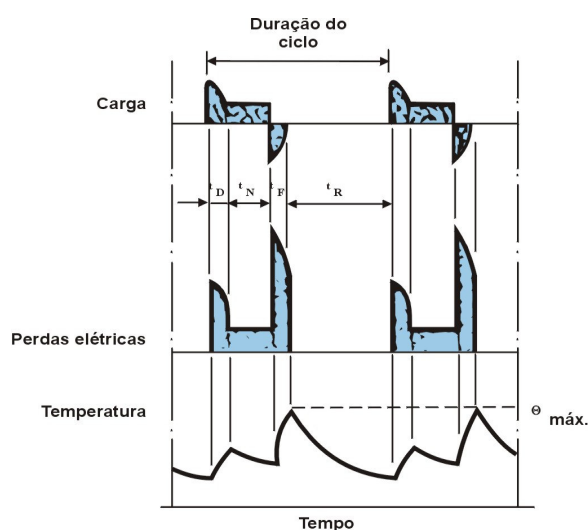



Figura 1.61

Onde: t_D – partida;
t_N – funcionamento em carga constante;
t_F – frenagem elétrica;
t_R – repouso;
$\Theta_{máx}$ – temperatura máxima atingida.

$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{t_D + t_N + t_F}{t_N + t_R + t_D + t_F} \times 100\%$$

f) Regime de Funcionamento Contínuo com Carga Intermitente (S6):

A seqüência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de funcionamento a carga constante e de um período de funcionamento em vazio, não existindo período de repouso (figura 1.62).

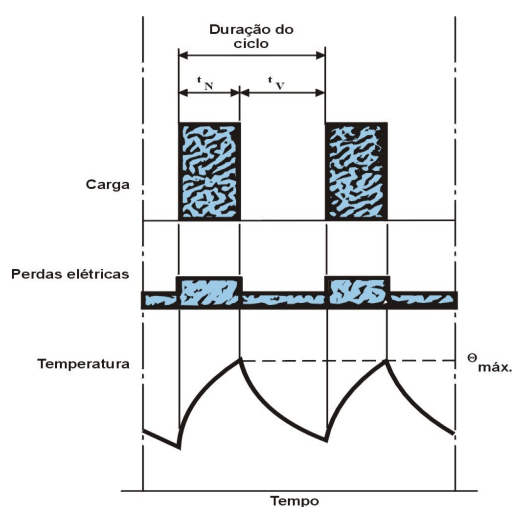



Figura 1.62

Onde: t_N – funcionamento em carga constante;
t_V – funcionamento em vazio;
$\Theta_{máx}$ – temperatura máxima atingida.

$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{t_N}{t_N + t_V} \times 100\%$$

g) Regime de Funcionamento Contínuo com Frenagem Elétrica (S7):

É a seqüência de ciclos de regimes idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, de um período de funcionamento a carga constante e um período de frenagem elétrica, não existindo o período de repouso (figura 1.63).

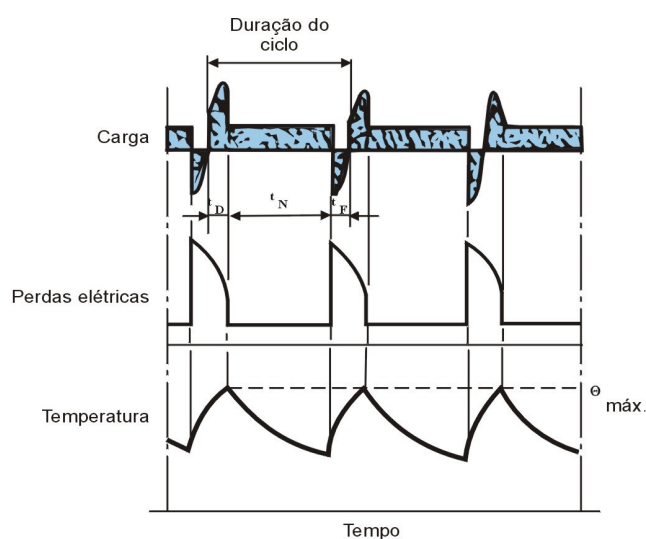



Figura 1.63

Onde: t_D – partida;
t_N – funcionamento em carga constante;
t_F – frenagem elétrica;
$\Theta_{máx}$ – temperatura máxima atingida.

Fator de duração do ciclo = 1

h) Regime de Funcionamento Contínuo com Mudança Periódica na Relação Carga/Velocidade de Rotação (S8):

A seqüência de ciclos de regimes idênticos, cada ciclo consistindo de um período de partida e um período de funcionamento a carga constante, correspondendo a uma velocidade de rotação pré-determinada, seguidos de um ou mais períodos de funcionamento a outras cargas constantes, correspondentes a diferentes velocidades de rotação. Não existe período de repouso (figura 1.64).

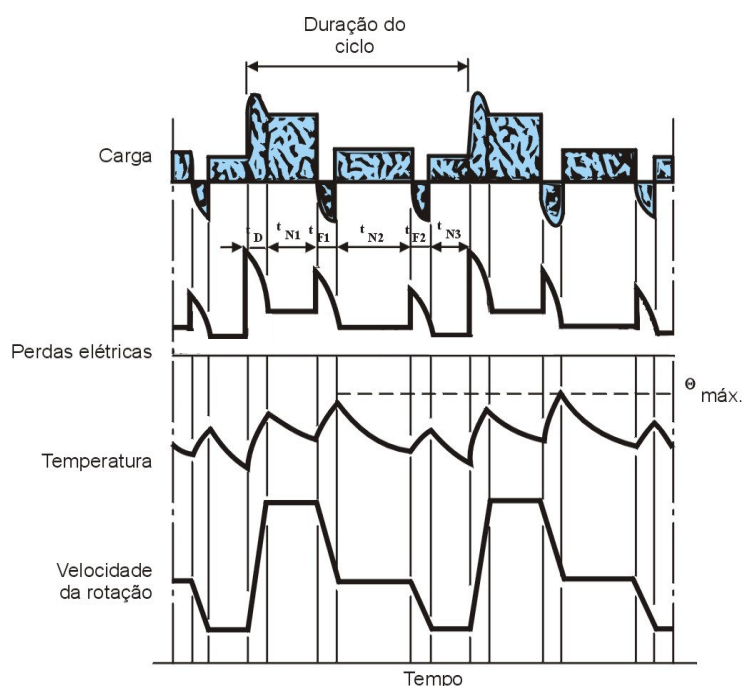



Figura 1.64

Onde: t_{F1} - t_{F2} – frenagem elétrica;
t_D – partida;
t_{N1}-t_{N2}-t_{N3} – funcionamento em carga constante;
$\Theta_{máx}$ – temperatura máxima atingida.

Fator de duração do ciclo

$$= \frac{t_D + t_{N1}}{t_D + t_{N1} + t_{F1} + t_{N2} + t_{F2} + t_{N3}} \times 100\%$$

$$= \frac{t_{F1} + t_{N2}}{t_D + t_{N1} + t_{F1} + t_{N2} + t_{F2} + t_{N3}} \times 100\%$$

$$= \frac{t_{F2} + t_{N3}}{t_D + t_{N1} + t_{F1} + t_{N2} + t_{F2} + t_{N3}} \times 100\%$$

NOTA: nos regimes S3 e S8, o período é geralmente curto demais para que seja atingido o equilíbrio térmico, de modo que o motor vai se aquecendo e resfriando parcialmente a cada ciclo. Depois de um grande número de ciclos o motor atinge uma faixa de elevação de temperatura e equilíbrio.

*i) **Regimes Especiais:***

Onde a carga pode variar durante os períodos de funcionamento, existe reversão ou frenagem por contra-corrente, etc., a escolha do motor adequado, deve ser feita mediante consulta à fábrica e depende de uma descrição completa do ciclo:

- Potência necessária para acionar a carga ou, se ela varia conforme um gráfico de potência requerida durante um ciclo (a figura 1.63 mostra um gráfico simples, onde a potência varia no período de carga);
- Conjugado resistente da carga;
- Momento de inércia total (GD^2 ou J) da máquina acionada, referida à sua rotação nominal.
- Número de partidas, reversões, frenagens por contra-corrente, etc.;
- Duração dos períodos em carga e em repouso ou vazio.

1.6.4.2 *DESIGNAÇÃO DO REGIME TIPO*

O regime tipo é designado pelo símbolo descrito no item 1.6.3. No caso de regime contínuo, este pode ser indicado, em alternativa, pela palavra "contínuo". Exemplos das designações dos regimes:

- S2 60 segundos;

A designação dos regimes S2 à S8 é seguida das seguintes indicações:

a) S2, do tempo de funcionamento em carga constante;
b) S3 à S6, do fator de duração do ciclo;
c) S8, de cada uma das velocidades nominais que constituem o ciclo, seguida da respectiva potência nominal e do seu respectivo tempo de duração.

Nos casos dos regimes S4, S5, S7 e S8, outras indicações a serem acrescidas à designação, deverão ser estipuladas mediante acordo entre fabricante e comprador.

Nota: como exemplo das indicações a serem acrescidas, mediante o referido acordo às designações de regimes tipo diferentes do contínuo, citam-se as seguintes, aplicáveis segundo o regime tipo considerado:

a) Número de partidas por hora;
b) Número de frenagens por hora;
c) Tipo de frenagens;
d) Constante de energia cinética (H), na velocidade nominal, do motor e da carga, esta última podendo ser substituída pelo fator de inércia (FI).

Onde: constante de energia cinética é a relação entre a energia cinética (armazenada no rotor à velocidade de rotação nominal) e a potência aparente nominal. Fator de inércia é a relação

entre a soma do momento de inércia total da carga (referido ao eixo do motor) e do momento de inércia do rotor.

- S3 25%; S6 40%;
- S8 motor H.1, FI.10, 33cv 740rpm 3min;

Onde H.1 significa uma constante de energia cinética igual a 1s e FI.10 significa um fator de inércia igual a 10.

1.6.4.3 *FATOR DE REDUÇÃO DE POTÊNCIA NO MOTOR CC*

Para os regimes S2 e S3 pode ser estimada a potência equivalente em regime S1, indicada no catálogo.

Nas tabelas a seguir podem ser obtidos os valores mais usuais para as diferentes ventilações. Nas figuras abaixo obtêm-se valores intermediários.

Tipo DC(N)E

REGIME	*POTÊNCIA PERMITIDA*
S2 – 30 min	180% da potência do catálogo
S2 – 60 min	150% da potência do catálogo
S3 – 40% ED	150% da potência do catálogo
S3 – 60% ED	125% da potência do catálogo

Tipos DC(N)F, DC(N)D, DC(N)S, DC(N)X, DC(N)A

REGIME	*POTÊNCIA PERMITIDA*
S2 – 30 min	107% da potência do catálogo
S2 – 60 min	100% da potência do catálogo
S3 – 40% ED	120% da potência do catálogo
S3 – 60% ED	110% da potência do catálogo

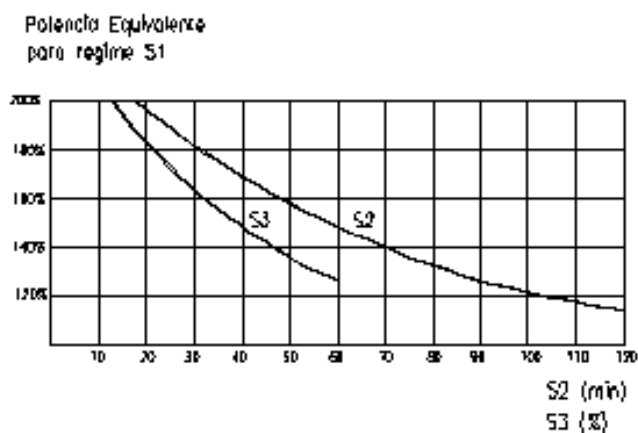



Figura - Fator de redução da potência Tipo DC(N)E

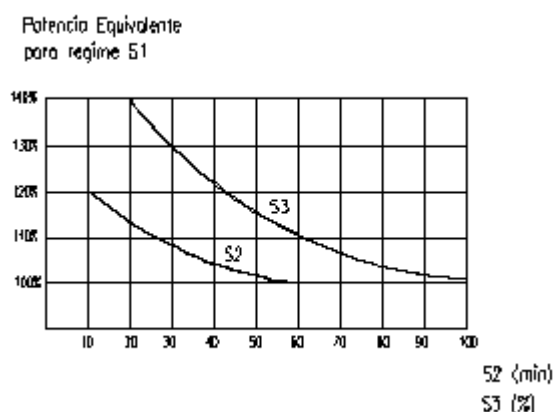



Figura – Fator de redução da potência Tipo DC(N)F,
DC(N)D, DC(N)S, DC(N)X, DC(N)A

1.6.4.4 *POTÊNCIA NOMINAL*

É a potência que o motor pode fornecer, dentro de suas características nominais, em regime contínuo. O conceito de potência nominal, ou seja, a potência que o motor pode fornecer, está intimamente ligado à elevação de temperatura do enrolamento. Sabe-se que o motor pode acionar cargas de potências bem acima de sua potência nominal, até quase atingir o conjugado máximo. O que acontece, porém, é que, se esta sobrecarga for excessiva, isto é, for exigida do motor uma potência muito acima daquela para a qual foi projetado, o aquecimento normal será ultrapassado e a vida do motor será diminuída, podendo ele, até mesmo, queimar-se rapidamente.

Deve-se sempre ter em mente, que a potência solicitada ao motor é definida pelas características da carga, isto é, independentemente da potência do motor, ou seja: para uma carga de 90 cv solicitada de um motor, por exemplo, independentemente deste ser de 75 cv ou 100 cv, a potência solicitada ao motor será de 90 cv.

1.6.5 *FATOR DE SERVIÇO (FS)*

Chama-se fator de serviço (FS) o fator que, aplicado à potência nominal, indica a carga permissível que pode ser aplicada continuamente ao motor sob condições especificadas. Note que trata-se de uma capacidade de sobrecarga contínua, ou seja, uma reserva de potência que dá ao motor uma capacidade de suportar melhor o funcionamento em condições desfavoráveis. O fator de serviço não deve ser confundido com a capacidade de sobrecarga momentânea, durante alguns minutos. Os motores WEG podem suportar sobrecargas até 60% da carga nominal, durante 15 segundos. O fator de serviço FS = 1,0, significa que o motor não foi projetado para funcionar continuamente acima de sua potência nominal. Isto, entretanto, não muda a sua capacidade para sobrecargas momentâneas. A NBR 7094 especifica os FS usuais por potência.

1.7 CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE

A potência admissível do motor de indução é determinada levando-se em consideração, principalmente, dois fatores:

- Altitude em que o motor será instalado;
- Temperatura do meio refrigerante.

Conforme a NBR 7094, as condições usuais de serviço, são:

a) Altitude não superior a 1000m acima do nível do mar;
b) Meio refrigerante (na maioria dos casos, o ar ambiente) com temperatura não superior a 40°C e isenta de elementos prejudiciais.

Até estes valores de altitude e temperatura ambiente, considera-se condições normais e o motor deve fornecer, sem sobreaquecimento, sua potência nominal.

1.7.1 *ALTITUDE*

Motores funcionando em altitudes acima de 1000m, apresentam problemas de aquecimento causado pela rarefação do ar e, consequentemente, diminuição do seu poder de arrefecimento.

A insuficiente troca de calor entre o motor e o ar circundante, leva a exigência de redução de perdas, o que significa, também, redução de potência.

Os motores têm aquecimento diretamente proporcional às perdas e estas variam, aproximadamente, numa razão quadrática com a potência. Existem ainda três soluções possíveis:

a) A instalação de um motor em altitudes acima de 1000 metros pode ser feita usando-se material isolante de classe superior;
b) Motores com fator de serviço maior que 1,0 (1,15 ou maior) trabalharão satisfatoriamente em altitudes acima de 1000m com temperatura ambiente de 40°C desde que seja requerida pela carga, somente a potência nominal do motor;
c) Segundo a norma NBR 7094 (antiga EB 120), os limites de elevação de temperatura deverão ser reduzidos de 1% para cada 100m de altitude acima de 1000m. Esta redução deve ser arredondada para o número de ºC inteiro imediatamente superior.

Exemplo: Motor de 100cv, isolamento B, trabalhado numa altitude de 1500m acima do nível do mar, a elevação de temperatura permitida pela classe de isolamento será reduzida 5%.

$$\Delta T = 80 - (80 \times 0{,}05) = 76^{o}\,C$$

1.7.1.1 *CONSIDERAÇÃO PARA O MOTOR CC*

Como no motor CA, o motor CC leva a exigência de redução de perdas, o que significa também, redução de potência do motor, de acordo com o seu modelo:

Altura acima do nível do mar (m)	*Temperatura ambiente em (°C)*						
	30	30	40	45	50	55	60
1000	105	100	100	92	85	77	70
1500	102	92	92	85	77	70	63
2000	100	85	85	77	70	63	58

Tabela 1.7.1.1 Potência permitida em % da potência do catálogo **– Tipo DC(N)E**

Altura acima do nível do mar (m)	*Temperatura ambiente em (°C)*						
	30	30	40	45	50	55	60
1000	105	100	100	95	90	85	80
1500	102	95	95	90	85	80	77
2000	100	90	90	85	80	77	74

Tabela 1.7.1.2 Potência permitida em % da potência do catálogo **Tipos DC(N)F, DC(N)D, DC(N)S, DC(N)X, DC(N)W**

Altura acima do nível do mar (m)	*Temperatura ambiente em (°C)*						
	30	30	40	45	50	55	60
1000	105	100	100	93	88	83	77
1500	102	93	93	88	83	77	70
2000	100	88	88	83	77	70	66

Tabela 1.7.1.3 Potência permitida em % da potência do catálogo **– Tipo DC(N)A**

1.7.2 *TEMPERATURA AMBIENTE*

Motores que trabalham em temperaturas inferiores a –20°C, apresentam os seguintes problemas:

a) Excessiva condensação, exigindo drenagem adicional ou instalação de resistência de aquecimento, caso o motor fique longos períodos parado.

b) Formação de gelo nos mancais, provocando endurecimento das graxas ou lubrificantes nos mancais, exigindo o emprego de lubrificantes especiais ou graxa anticongelante, conforme especificado no Manual de Instalação e Manutenção WEG.

Em motores que trabalham à temperaturas ambientes constantemente superiores a 40°C, o enrolamento pode atingir temperaturas prejudiciais à isolação. Este fato tem que ser compensado por um projeto especial do motor, usando materiais isolantes especiais ou pela redução da potência nominal do motor.

1.7.3 *DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA ÚTIL DO MOTOR NAS DIVERSAS CONDIÇÕES DE TEMPERATURA E ALTITUDE*

Associando os efeitos da variação da temperatura e da altitude, a capacidade de dissipação da potência do motor pode ser obtida multiplicando-se a potência útil pelo fator de multiplicação (α) obtido na tabela 1.7.3.1.

T \ H	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
10							1,05
15						1,05	0,99
20					1,05	0,99	0,93
25				1,05	0,98	0,93	0,88
30			1,04	0,97	0,92	0,87	0,82
35		1,02	0,96	0,91	0,86	0,81	0,77
40	1,00	0,94	0,89	0,85	0,80	0,76	0,72
45	0,92	0,87	0,83	0,78	0,74	0,70	0,67
50	0,85	0,80	0,76	0,72	0,68	0,65	0,62
55	0,77	0,74	0,70	0,66	0,63	0,60	0,57
60	0,71	0,67	0,64	0,60	0,57	0,55	0,52

Tabela 1.7.3.1 – Fator de multiplicação da potência útil em função da temperatura ambiente (T) em "ºC" e da altitude (H) em "m".

Exemplo: Um motor de 100cv, isolamento B, para trabalhar num local com altitude de 2000m e a temperatura ambiente é de 55°C. da tabela 1.7.3.1, α=0,70 logo:

$$P' = 0,70 \times P_n$$

O motor poderá fornecer apenas 70% de sua potência nominal.

1.7.4 *ATMOSFERA AMBIENTE*

1.7.4.1 *AMBIENTES AGRESSIVOS*

Ambientes agressivos, tais como estaleiros, instalações portuárias, indústria de pescados e múltiplas aplicações navais, indústria química e petroquímica, exigem que os equipamentos que neles trabalham sejam perfeitamente adequados para suportar tais circunstâncias com elevada confiabilidade, sem apresentar problemas de qualquer espécie.

Para aplicação de motores nestes ambientes agressivos, a WEG desenvolveu uma linha de motores, projetados para atender os requisitos especiais e padronizados para as condições mais severas que possam ser encontradas. Os motores deverão ter as seguintes características especiais:

- Enrolamento duplamente impregnado;
- Pintura anti-corrosiva alquídica, interna e externa;
- Placa de identificação de aço inoxidável;
- Elementos de montagem zincados;
- Ventilador de material não faiscante;
- Retentores de vedação entre o eixo e as tampas;
- Juntas de borracha para vedar a caixa de ligação;
- Massa de calafetar na passagem dos cabos de ligação pela carcaça;
- Caixa de ligação de ferro fundido.

No caso de motores navais, as características de funcionamento específicas são determinadas pelo tipo de carga acionada abordo. Todos os motores porém, apresentam as seguintes características especiais:

- Elevação de temperatura reduzida para funcionamento em ambientes até 50°C;
- Capacidade de suportar, sem problemas, sobrecargas ocasionais de curta duração de até 60% acima do conjugado nominal, conforme normas das Sociedades Classificadoras.

No que diz respeito ao controle rígido para assegurar a confiabilidade em serviço, os motores navais WEG se enquadram nas exigências de construção, inspeção e ensaios estabelecidos nas normas das Sociedades Classificadoras, entre as quais:

- AMERICAN BUREAU OF SHIPPING;
- BUREU VERITAS;
- LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING;
- GERMANISCHER LLOYD.

1.7.4.2 *AMBIENTES CONTENDO POEIRAS OU FIBRAS*

Para analisar se os motores podem ou não trabalhar nestes ambientes, devem ser informados os seguintes dados: tamanho e quantidade aproximada das fibras contidas no ambiente. O tamanho e a quantidade de fibras são fatores importantes, pois, dependendo do tamanho, podem provocar, no decorrer do tempo, a obstrução da ventilação, provocando aquecimento do motor. Quando o conteúdo de fibras for elevado, devem ser empregados filtros de ar ou efetuar a limpeza dos motores.

1.7.4.3 *LOCAIS EM QUE A VENTILAÇÃO DO MOTOR É PREJUDICADA*

Neste casos, existem duas soluções:

- Utilizar motores sem ventilação;
- Para motores com ventilação por dutos, calcula-se o volume de ar deslocado pelo ventilador do motor determinando a circulação de ar necessária para a perfeita refrigeração do motor.

1.7.5 GRAUS DE PROTEÇÃO

Os invólucros dos equipamentos elétricos, conforme as características do local em que serão instalados e de sua acessibilidade, devem oferecer um determinado grau de proteção. Assim, por exemplo, um equipamento a ser instalado num local sujeito a jatos d'água, devem possuir um invólucro capaz de suportar tais jatos, sob determinados valores de pressão e ângulo de incidência, sem que haja penetração de água.

1.7.5.1 CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO

A norma NBR 6146 define os graus de proteção dos equipamentos elétricos por meio das letras características IP, seguida por dois algarismos.

1° Algarismo	
Algarismo	**Indicação**
0	Sem proteção
1	Corpos estranhos de dimensões acima de 50mm
2	Corpos estranhos de dimensões acima de 12mm
3	Corpos estranhos de dimensões acima de 2,5mm
4	Corpos estranhos de dimensões acima de 1,0mm
5	Proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor
6	Totalmente protegido contra a poeira

Tabela 1.7.5.1.1 – 1° Algarismo: indica o grau de proteção contra penetração de corpos sólidos estranhos e contato acidental

2° Algarismo	
Algarismo	**Indicação**
0	Sem proteção
1	Pingos de água na vertical
2	Pingos de água até a inclinação de 15° com a vertical
3	Água de chuva até a inclinação de 60° com a vertical
4	Respingos de todas as direções
5	Jatos de água de todas as direções
6	Água de vagalhões
7	Imersão temporária
8	Imersão permanente

Tabela 1.7.5.1.2 – 2° Algarismo: indica o grau de proteção contra penetração de água no interior do motor

As combinações entre os dois algarismos, isto é, entre os dois critérios de proteção, estão resumidos na tabela 1.7.5.1.3. Nota-se que, de acordo com a norma, a qualificação do motor em cada grau, no que se refere a cada um dos algarismos, é bem definida através de ensaios padronizados e não sujeita a interpretações, como acontecia anteriormente.

Motor	Classe de proteção	1º Algarismo		2º Algarismo
		Proteção contra contato	Proteção contra corpos estranhos	Proteção contra água
Motores Abertos	IP00	Não tem	Não tem	Não tem
	IP02	Não tem	Não tem	Pingos de água até uma inclinação de 15º com a vertical
	IP11	Toque acidental com a mão	Corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 50mm	Pingos de água na vertical
	IP12			Pingos de água até uma inclinação de 15º com a vertical
	IP13			Água da chuva até uma inclinação de 60º com a vertical
	IP21	Toque com os dedos	Corpos sólidos estranhos de dimensões de 12mm	Pingos de água na vertical
	IP22			Pingos de água até uma inclinação de 15º com a vertical
	IP23			Água da chuva até uma inclinação de 60º com a vertical
Motores Fechados	IP44	Toque com ferramentas	Corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 1mm	Respingos de todas as direções
	IP54	Proteção completa contra toque	Proteção contra acúmulo de poeiras nocivas	Respingos de todas as direções
	IP55	Proteção completa contra toque	Proteção contra acúmulo de poeiras nocivas	Jatos de água em todas as direções
	IP(W)55	Proteção completa contra toques	Proteção contra acúmulo de poeiras nocivas	Chuva, maresia

Tabela 1.7.5.1.3 – Graus de proteção

1.7.5.2 *TIPOS USUAIS DE PROTEÇÃO*

1.7.5.2.1 *MOTORES DE BAIXA TENSÃO*

Como no caso acima, somente alguns tipos de proteção são empregados nos casos normais. São eles: IP21M IP22, IP23 e IP44.

Os três primeiros são motores abertos e o último é motor totalmente fechado. Para aplicações especiais mais rigorosas, são comuns também os graus de proteção IP54 (ambientes

muito empoeirados) e IP55 (casos em que os equipamentos são lavados periodicamente com mangueiras, como em fábricas de papel).

Outros graus de proteção para motores são raramente fabricados, mesmo porque, qualquer grau de proteção satisfaz plenamente os graus de proteção inferiores (algarismos mais baixos).

Assim, por exemplo, um motor IP44 substitui com vantagem os IP21, IP22 e IP23, apresentando maior segurança contra exposição acidental a poeiras e água. Isto permite padronização da produção em um único tipo que atenda a todos os casos, com vantagem adicional para o comprador nos casos de ambientes menos exigentes.

1.7.5.2.2 *TIPOS USUAIS DE PROTEÇÃO PARA O MOTOR CC*

Embora os algarismos indicativos de graus de proteção possam ser combinados de muitas maneiras, somente alguns tipos de proteção são empregados nos casos normais para os motores CC. São eles: IP21, IP22, IP23 e IP44.

Os três primeiros são motores abertos e o último é motor totalmente fechado.

Para aplicações especiais mais rigorosas, são comuns também os graus de proteção IP54 (ambientes muito empoeirados) e IP55 (casos em que os equipamentos são lavados periodicamente com mangueiras, como em fábricas de papel).

Assim, por exemplo, um motor IP44 substitui com vantagem os IP12, IP22 e IP23, apresentando maior segurança contra exposição acidental a poeira e água. Isto permite padronização da produção em um único tipo que atenda a todos os casos, com vantagem adicional para o comprador nos casos de ambientes menos exigentes

1.7.5.3 *MOTORES A PROVA DE INTEMPÉRIES (MOTORES CA)*

Como visto anteriormente, a letra (W), colocada entre as letras IP e os algarismos indicativos do grau de proteção, indica que o motor é protegido contra intempéries.

Exemplo: IP(W)55 significa motor com grau de proteção IP55 quanto a penetração de poeiras e água, sendo, além disso, protegido contra intempéries (chuva, maresia, etc.), também chamados motores de uso naval.

Ambientes agressivos exigem que os equipamentos que neles trabalham, sejam perfeitamente adequados para suportar tais circunstâncias com elevada confiabilidade, sem apresentar problemas de qualquer espécie.

A WEG produz variada gama de motores elétricos com características técnicas especiais, apropriadas à utilização em estaleiros, instalações portuárias, indústria do pescado e múltiplas aplicações navais, além das indústrias químicas e petroquímicas e outros ambientes de condições agressivas. São a prova de tempo e adequados aos mais severos regimes de trabalho.

Os motores WEG para ambientes agressivos, IP(W)55, distinguem-se dos de proteção IP54, pelas seguintes características:

- Enrolamento duplamente impregnado (carcaças 225 à 355);
- Pintura anti-corrosiva alquídica externa;

- Placa de características em aço inoxidável;
- Elementos de montagem zincados;
- Retentor de vedação entre o eixo e as tampas;
- Caixa de ligação vedada com juntas de borracha;
- Espuma na passagem dos cabos de ligação pela carcaça;
- Ventilador de material não faiscante;
- Drenos automáticos de saída de água condensada no interior do motor;
- Terminal para conexão do fio-terra no interior da caixa de ligação;
- Placa de bornes;
- Rolamentos com folga C3 (carcaça 160L à 355);
- Sistemas de relubrificação (graxeiras) (carcaças 225 à 355)

Opcionais (quando exigidos pelo cliente):

- Isolamento classe F (155°C) ou H (180°C);
- Pintura a base de resina epóxi;
- Impregnação a base de resina epóxi;
- Resistências internas desumificadoras;
- Sondas térmicas bimetálicas;
- Termistores;
- Carcaça com caixa de ligação superior;
- Graxeiras de relubrificação nas carcaças 160 à 200;
- Labirinto metálico tipo anel de nilos (carcaça 90 à 112) e taconite (carcaças 132 à 355);
- Ensaios de rotina, tipo, especial e protótipo (conforme norma NBR 5383), com ou sem a presença do inspetor.

1.7.6 *VENTILAÇÃO MOTORES CA*

1.7.6.1 *SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO*

As perdas são inevitáveis no motor e o calor gerado por elas deve ser dissipado, ou seja, transferido para o elemento de resfriamento do motor, usualmente, o ar ambiente. A maneira pela qual é feita a troca de calor entre as partes aquecidas do motor e o ar ambiente é que define o "Sistema de Refrigeração" do motor. A classificação dos métodos de resfriamento foram definidos conforme a norma ABNT-NBR 5110 e/ou IEC-34.6. Os sistemas usuais de refrigeração são apresentados a seguir.

1.7.6.1.1 *VENTILAÇÃO AXIAL*

- ***Motor totalmente fechado (Linha HGF - Standard)***
  IC 0141

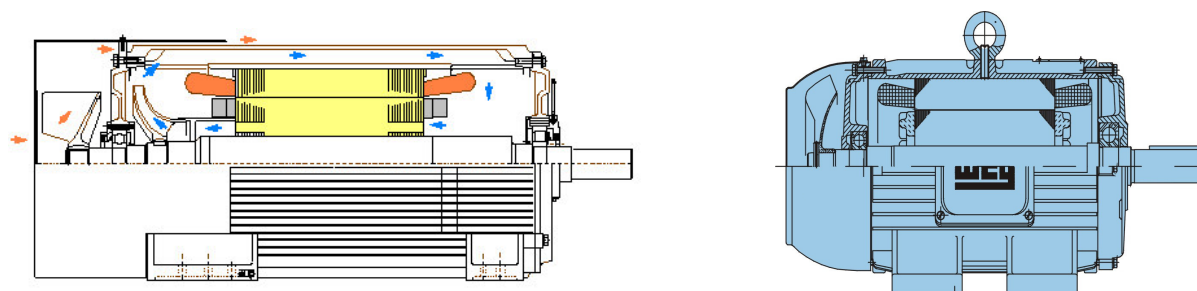
Máquina totalmente fechada, resfriada por ventilador e carcaça aletada (externa e internamente). Há ainda, canais axiais no pacote de chapas do estator e do rotor, como mostra a figura abaixo:

Linha HGF ***Standard***

Figura 1.65 - Motor totalmente fechado com ventilação externa.

- ***Aberto (AUTO-VENTILADO - Linha HGA)***
  IC 01

Neste sistema, o motor pode apresentar proteções IP23, IP24 ou equivalentes, caracterizando um motor aberto. Possui um ventilador interno acoplado ao eixo (a linha HGA possui também um ventilador externo), o qual aspira o ar ambiente que passa através da máquina, fazendo assim a troca de calor.

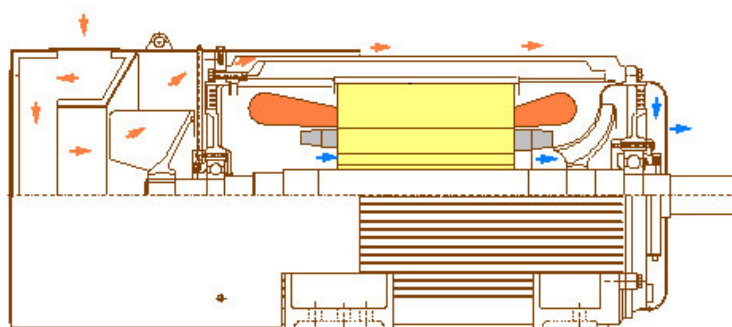



Figura 1.66 - Motor aberto.

1.7.6.1.2 *VENTILAÇÃO MISTA*

- ***Trocador de calor ar-ar (MGF, MAF)***
  IC 0161

O motor pode apresentar proteção IP55 ou equivalentes. Possui um ventilador interno e um externo acoplados ao eixo. O trocador de calor é montado na parte superior do motor.

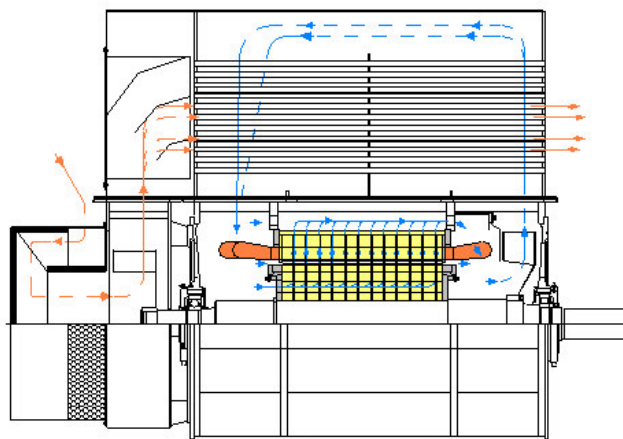



Figura 1.67 - Motor totalmente fechado com trocador de calor ar-ar.

- ***Aberto (AUTO-VENTILADO) (MGA, MAA, AGA)***
  IC 01

Neste sistema, o motor pode apresentar proteção IP23, IP24 ou equivalentes, caracterizando um motor aberto. Possui um ventilador interno acoplado ao eixo, o qual aspira o ar ambiente que passa através da máquina, fazendo assim a troca de calor.

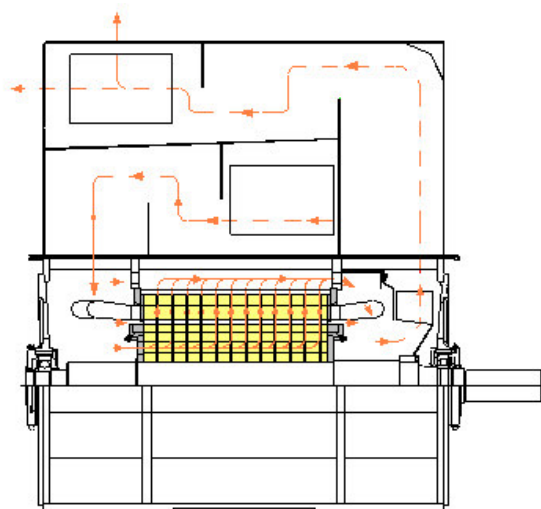
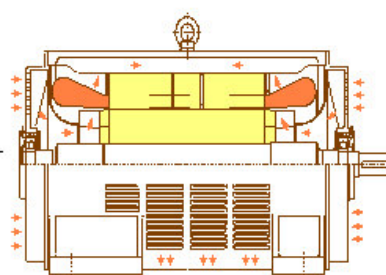



Figura 1.68 a - Motor aberto (MGA).   Figura 1.68 b - Motor aberto (AGA).

- ***Trocador de calor ar-água (MGW, MAW)***
 IC W 37A81

O motor com trocador de calor ar-água pode apresentar proteção IP55 ou equivalentes, caracterizando um motor fechado. O motor possui um ventilador acoplado no eixo.

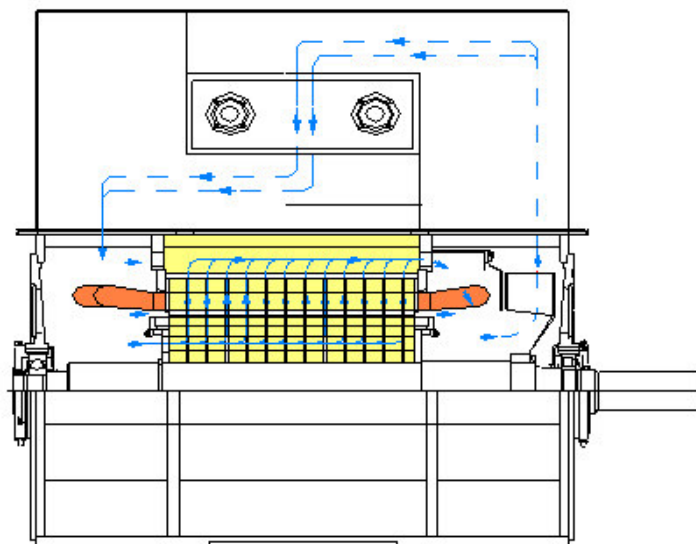



Figura 1.69 - Motor com trocador de calor ar-água.

- ***Auto-ventilado por dutos (MGD, MAD)***
 IC 33

Neste sistema, o motor apresenta um ventilador acoplado internamente no eixo, o qual aspira o ar de um recinto não contaminado que, após atravessar o motor, é devolvido ao meio ambiente.

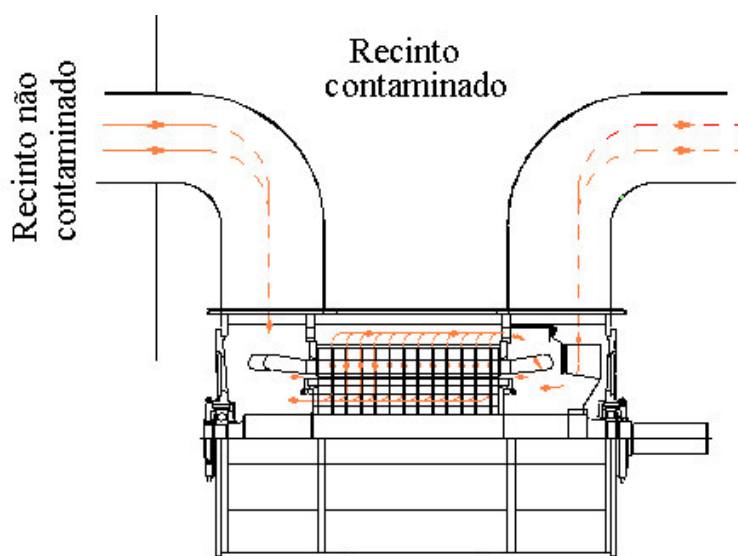



Figura 1.70 – Motor auto-ventilado por dutos.

- ***Ventilação independente com trocador de ar-ar (MGI, MAI)***
IC 0666

Neste sistema existe um ventilador independente que força a circulação interna do ar. O outro ventilador independente aspira o ar ambiente e o faz circular através do trocador de calor ar-ar.

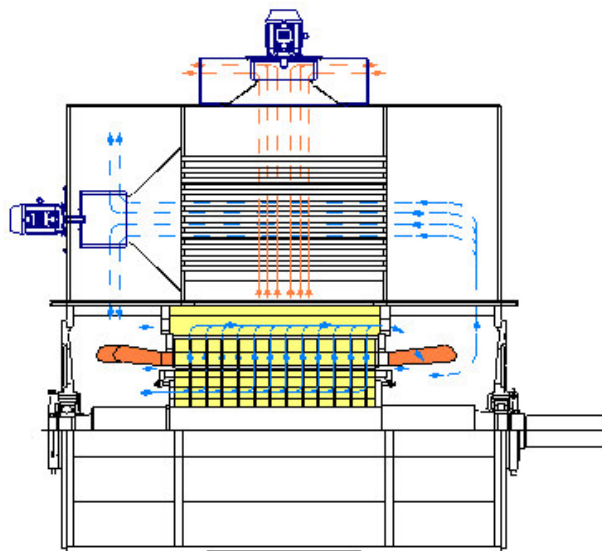



Figura 1.71 - Motor com ventilação independente e trocador de calor ar-ar.

- ***Ventilação independente, motor aberto (MGV, MAV)***
IC 06

O ar ambiente é forçado a circular através do motor por um ventilador independente acoplado no topo do motor, e em seguida, devolvido ao meio ambiente, como mostra a figura 1.72 abaixo:

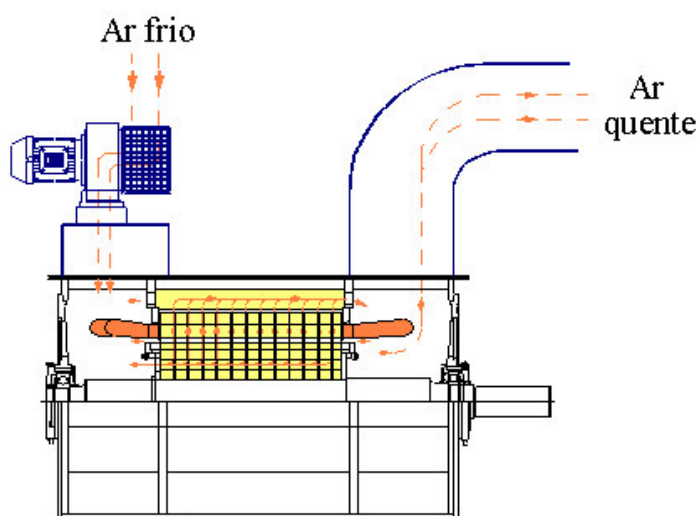



Figura 1.72 – Motor aberto com ventilação independente.

- ***Ventilação independente com trocador de calor ar-água (MGL, MAL) IC W 37A81***

Neste sistema existe um ventilador independente que força a ventilação do ar internamente ao motor através do trocador de calor ar-água.

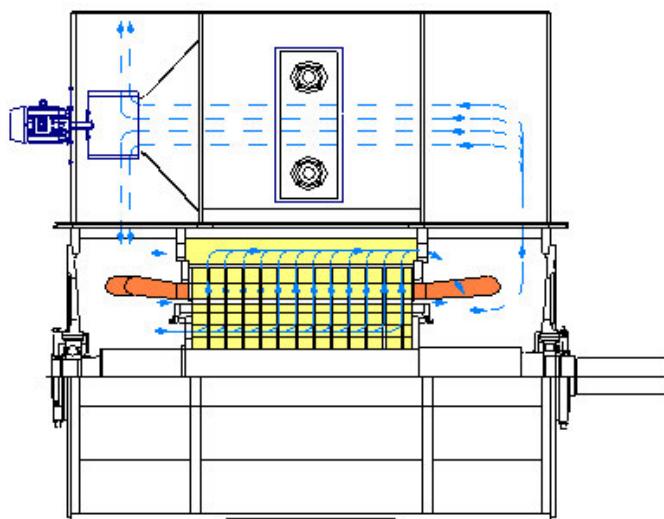



Figura 1.73 - Motor com ventilação independente com trocador de calor ar-água.

- ***Ventilação independente por dutos (MGT, MAT) IC 35***

O ar é aspirado de um recinto não contaminado e canalizado através de dutos até o motor, como mostra a figura abaixo:

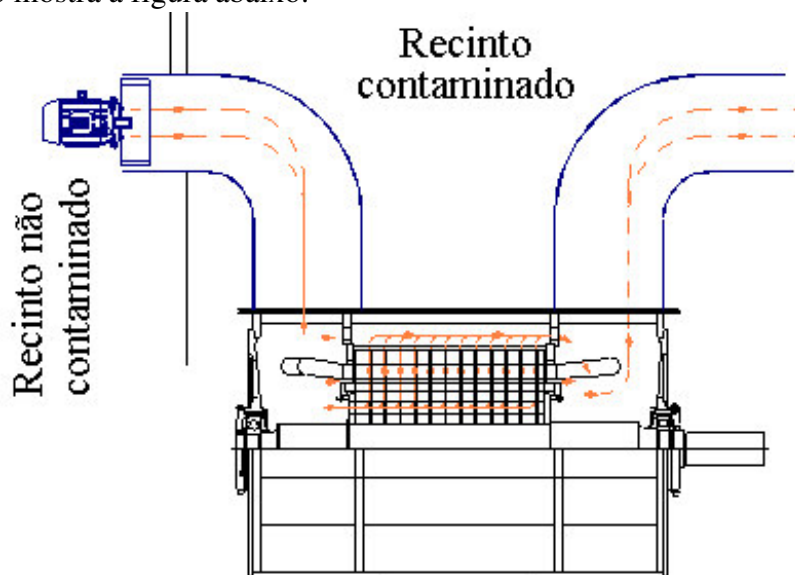



Figura 1.74 - Motor com ventilação independente por dutos.

1.7.6.1.3 *VENTILAÇÃO BILATERAL SIMÉTRICA*

- ***Trocador de calor ar-ar (MGF, MAF)***
  IC 0161

O motor pode apresentar proteção IP55 ou equivalentes. Possui ventiladores internos e externo acoplados ao eixo. O trocador de calor é montado na parte superior do motor.

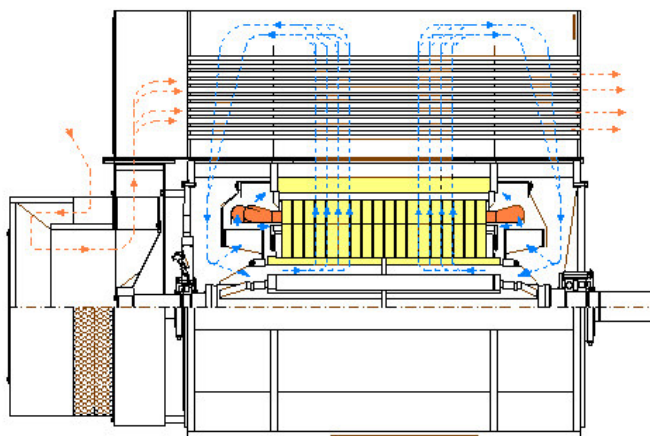



Figura 1.75 – Motor totalmente fechado com trocador de calor ar-ar.

- ***Aberto (AUTO-VENTILADO) (MGA, MAA, AGA)***
  IC 01

Neste sistema, o motor pode apresentar proteção IP23, IP24 ou equivalentes, caracterizando um motor aberto. Possui dois ventiladores internos acoplados ao eixo, o qual aspira o ar ambiente que passa através da máquina, fazendo assim a troca de calor como mostra a figura abaixo:

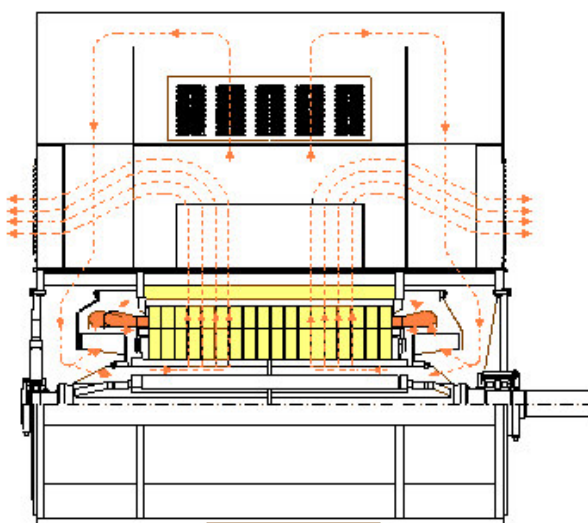



Figura 1.76 – Motor aberto.

- ***Trocador de calor ar-água (MGW, MAW)***
  IC W 37A81

O motor com trocador de calor ar-água pode apresentar proteção IP55 ou equivalentes, caracterizando um motor fechado. O motor possui dois ventiladores acoplados ao eixo.

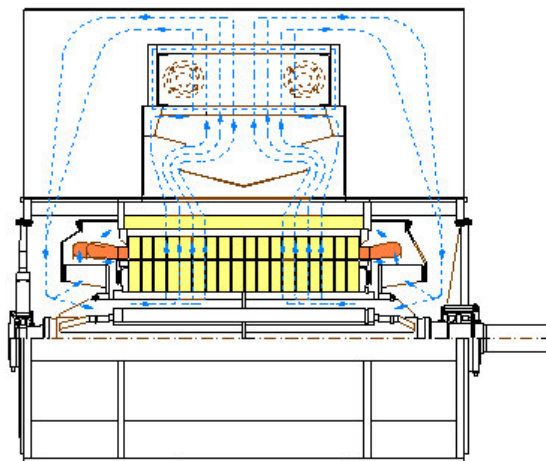



Figura 1.77 - Motor com trocador de calor ar-água.

- ***Auto-ventilado por dutos (MGD, MAD)***
  IC 33

Neste sistema, o motor apresenta dois ventiladores acoplados internamente ao eixo, o qual aspira o ar de um recinto não contaminado que, após atravessar o motor, é devolvido ao meio ambiente.

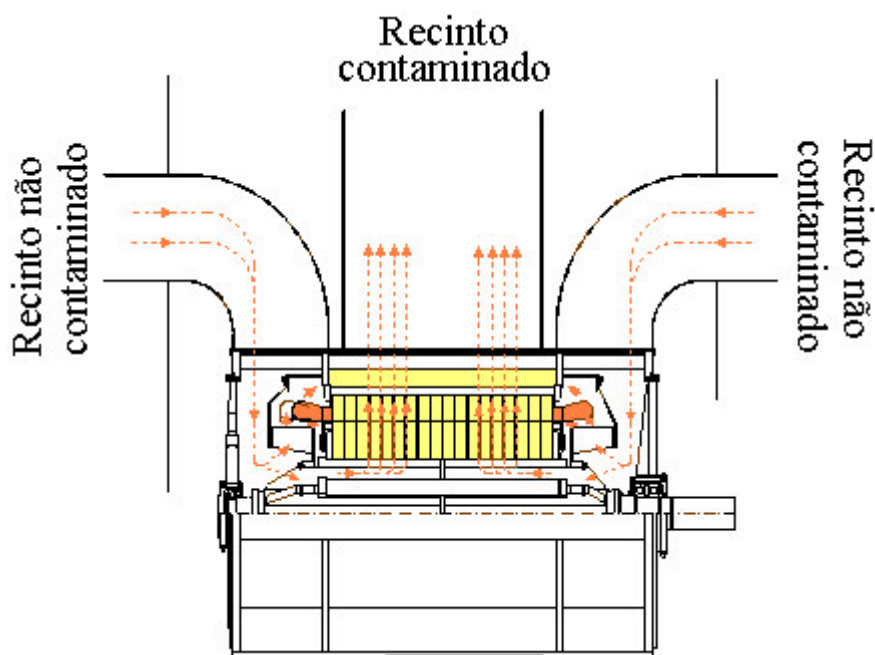



Figura 1.78 – Motor auto-ventilado por dutos.

- ***Ventilação independente com trocador de ar-ar (MGI, MAI)***
IC 0666

Neste sistema existe um ventilador independente que força a circulação interna do ar. O outro ventilador independente aspira o ar ambiente e o faz circular através do trocador de calor ar-ar.

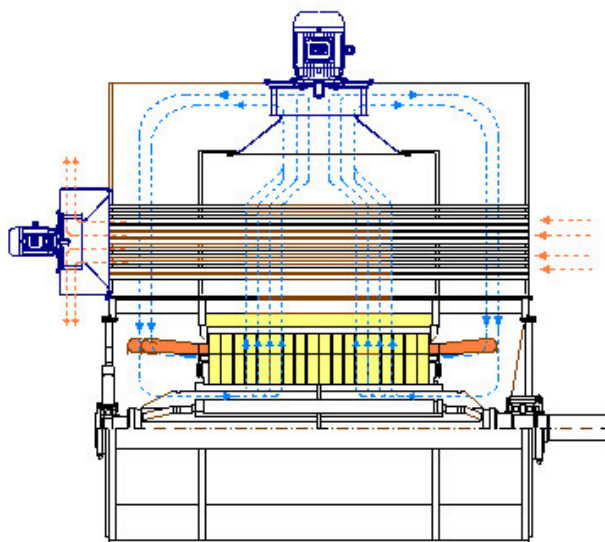



Figura 1.79 - Motor com ventilação independente e trocador ar-ar.

- ***Ventilação independente, motor aberto (MGV, MAV)***
IC 06

O ar ambiente é forçado a circular através do motor por dois ventiladores independentes acoplados no topo do motor, e em seguida, devolvido ao meio ambiente, como mostra a figura abaixo:

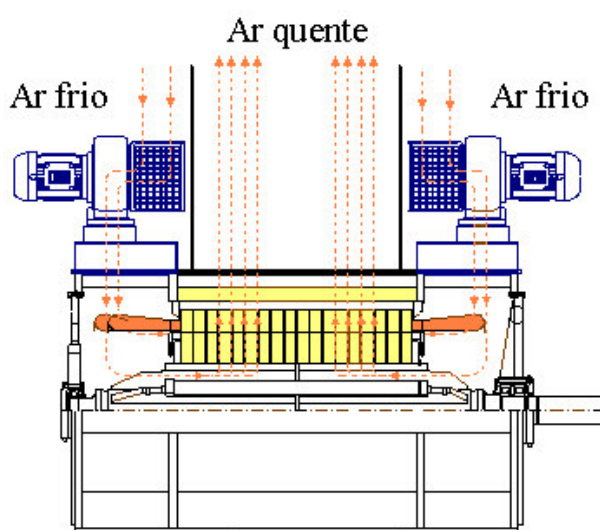



Figura 1.80 - Motor aberto com ventilação independente.

- ***Ventilação independente com trocador de calor ar-água (MGL, MAL)***
IC W 37A81

Neste sistema existe um ventilador independente que força a ventilação do ar internamente ao motor através do trocador de calor ar-água.

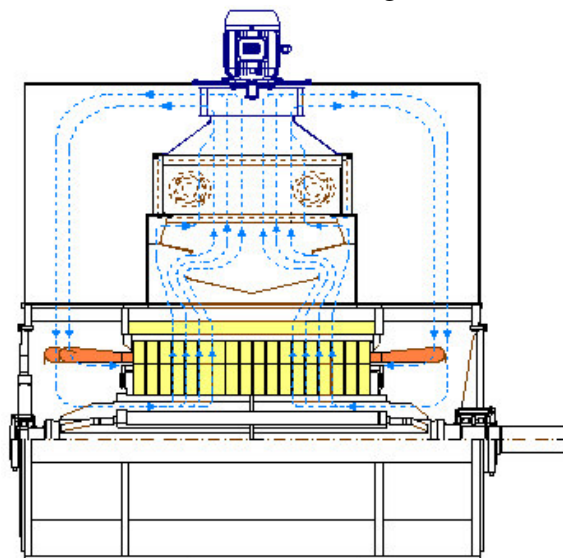



Figura 1.81 – Motor com ventilação independente com trocador ar-água.

- ***Ventilação independente por dutos (MGT, MAT)***
IC 35

O ar é aspirado (através de dois moto-ventiladores) de um recinto não contaminado e canalizado através de dutos até o motor, como mostra a figura abaixo:

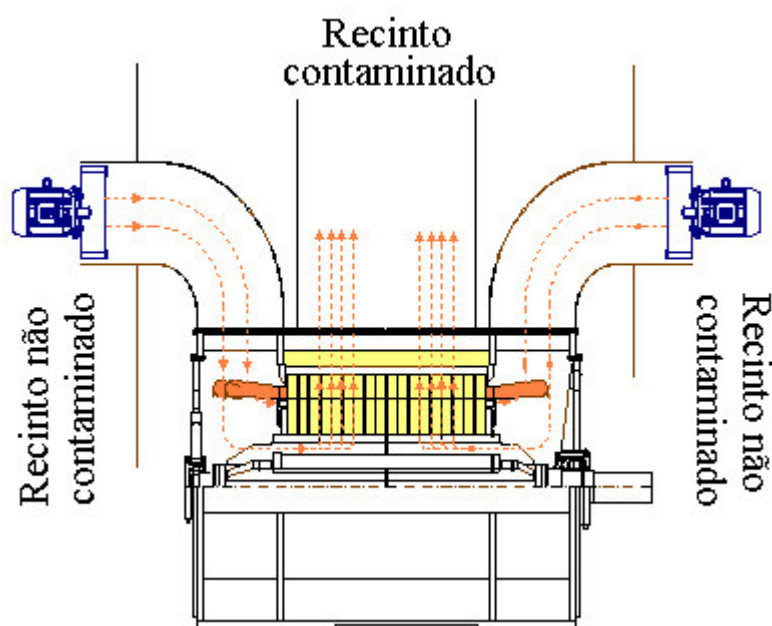
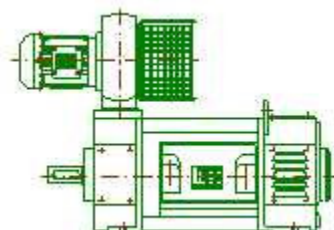
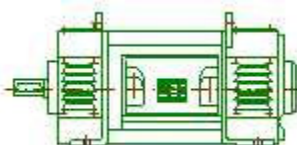



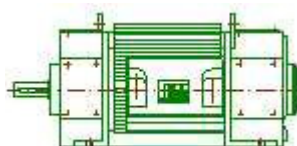
Figura 1.82 - Motor com ventilação independente por dutos.

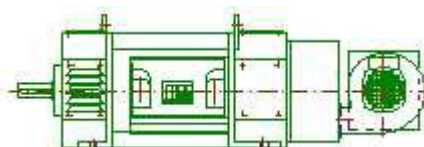
1.7.7 VENTILAÇÃO MOTORES CC

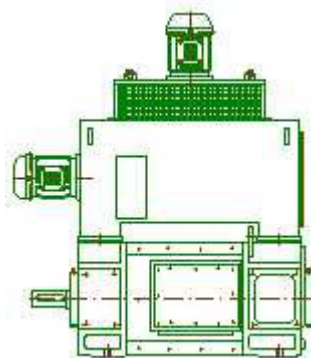
DNF/DCF

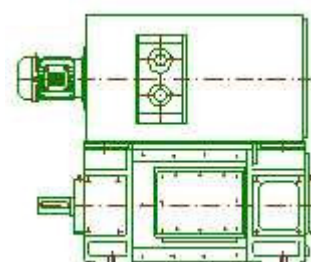
- Ventilação forçada (independente);
- Aberto (IP23S / IC06).

DNS / DCS

- Auto ventilado;
- Aberto (IP23S / IC01).

DNE / DCE

- Sem ventilação;
- Fechado (IP44 a IP(W)55 / IC410).

DNX / DCX

- Ventilação forçada (independente) axial;
- Aberto (IP23S / IC06).

DNA / DCA

- Ventilação por meio de trocador de calor ar-ar;
- Fechado (IP44 a IP(W)55 / IC666).

DNW / DCW

- Ventilação por meio de trocador de calor ar-água;
- Fechado (IP44 a IP(W)55 / IC410).

DND / DCD

- Ventilação forçada por dutos (IP23S / IC17), (IPR44-55 / IC37);

1.7.8 *RESISTÊNCIA DE AQUECIMENTO*

As resistências de aquecimento são instaladas quando um motor elétrico é instalado em ambientes muito úmidos, com a possibilidade de ficar desligado por longos períodos, impedindo o acúmulo de água, no interior do motor, pela condensação do ar úmido. As resistências de aquecimento, aquecem o interior do motor alguns graus acima do ambiente (5 à 10°C), quando o motor está desligado.

A tensão de alimentação das resistências de aquecimento, deverá ser especificada pelo cliente, sendo disponíveis em 110V, 220V e 440V.

Dependendo da carcaça, serão empregados os resistores de aquecimento, conforme tabela 1.7.7.

Carcaça	Potência (W)
63 à 90	8
100 à 112	16
132	24
160 à 200	48
225 à 250	90
280 à 355	180

Tabela 1.7.7 – Resistência de aquecimento

1.7.9 *LIMITE DE RUÍDOS*

Os motores WEG atendem as normas NEMA. IEC e NBR que especificam os limites máximos de nível de potência sonora, em decibéis. Os valores da tabela 1.7.8, estão conforme a NBR 7565.

Graus de Proteção			IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44
Velocidade Nominal (rpm) – "n"			n ≤ 960		960< n ≤ 1320		1320 < n ≤ 1900		1900 < n ≤ 2360		2360 < n ≤ 3150		3150 < n ≤ 3750	
Faixas de potências nominais – P			Nível de potência sonora dB (A)											
Geradores de corrente	Motores													
Alternada–Contínua kva kW	kW	cv												
P ≤ 1,1	P ≤ 1,1	P < 1,5	73	73	76	76	77	78	79	81	81	84	82	86
1,1 < P ≤ 2,2	1,1 < P ≤ 2,2	1,5 < P ≤ 3,0	74	74	78	78	81	82	83	85	85	86	86	91
2,2 < P ≤ 5,5	2,2 < P ≤ 5,5	3,0 < P ≤ 7,5	77	78	81	82	85	86	86	90	89	93	93	95
5,5 < P ≤ 11	5,5 < P ≤ 11	7,5 < P ≤ 15	81	82	85	85	88	90	90	93	93	97	97	96
11 < P ≤ 22	11 < P ≤ 22	15 < P ≤ 30	84	86	88	88	91	94	93	97	96	100	97	100
22 < P ≤ 37	22 < P ≤ 37	30 < P ≤ 50	87	90	91	91	94	98	96	100	99	102	101	102
37 < P ≤ 55	37 < P ≤ 55	50 < P ≤ 75	90	93	95	94	96	100	98	102	101	104	103	104
55 < P ≤ 110	55 < P ≤ 110	75 < P ≤ 150	93	96	97	95	100	103	101	104	103	106	105	106
110 < P ≤ 220	110 < P ≤ 220	150 < P ≤ 300	97	99	100	102	103	106	103	108	105	109	107	110
220 < P ≤ 630	220 < P ≤ 630	300 < P ≤ 860	99	102	103	105	106	108	106	109	107	111	110	113
630 < P ≤ 1100	630 < P ≤ 1100	860 < P ≤ 1500	101	105	106	108	108	111	108	111	109	112	111	116
1100 < P ≤ 2500	1100 < P ≤ 2500	1500 < P ≤ 3400	103	107	108	110	109	113	109	113	110	113	112	118
2500 < P ≤ 6300	2500 < P ≤ 6300	3400 < P ≤ 8600	106	109	110	112	110	115	111	115	112	115	114	120

Tabela 1.7.8 – Nível de potência sonora – dB(A) NBR 7565

1.8 AMBIENTES PERIGOSOS

1.8.1 *ÁREAS DE RISCO*

Uma instalação onde produtos inflamáveis são continuamente manuseados, processados ou armazenados, necessita, obviamente, de cuidados especiais que garantam a manutenção do patrimônio e preservem a vida humana.

Os equipamentos elétricos, por suas próprias características, podem representar fontes de ignição, quer seja por superaquecimento de algum componente, seja ele intencional ou causado por correntes de defeito.

1.8.2 *ATMOSFERA EXPLOSIVA*

Uma atmosfera é explosiva quando a proporção de gás, vapor, pó ou fibras é tal, que uma faisca proveniente de um circuito elétrico ou o aquecimento de um aparelho provoca a explosão. Para que se inicie uma explosão, três elementos são necessários:

COMBUSTÍVEL + OXIGÊNIO + FAÍSCA = EXPLOSÃO

1.8.3 *CLASSIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE RISCO*

De acordo com as normas ABNT/IEC, as áreas de risco são classificadas em:

- ***Zona 0:***

Região onde a ocorrência de mistura inflamável e/ou explosiva é contínua, ou existe por longos períodos. Por exemplo, a região interna de um tanque de combustível. A atmosfera explosiva está sempre presente.

- ***Zona 1:***

Região onde a probabilidade de ocorrência de mistura inflamável e/ou explosiva está associada à operação normal do equipamento e do processo. A atmosfera explosiva está freqüentemente presente.

- ***Zona 2:***

Locais onde a presença de mistura inflamável e/ou explosiva não é provável de ocorrer, e se ocorrer, é por poucos períodos. Está associada à operação anormal do equipamento e do processo. Perdas ou uso negligente. A atmosfera explosiva pode acidentalmente estar presente.

De acordo com a norma NEC, as áreas de risco são classificadas em divisões:

- ***Divisão I*** – Região onde se apresenta uma ALTA probabilidade de ocorrência de uma explosão.

- ***Divisão II*** – Região de menor probabilidade.

Normas	Ocorrência de mistura inflamável		
	Contínua	**Em condição normal**	**Em condição anormal**
IEC	Zona 0	Zona 1	Zona 2
NEC/API	Divisão 1		Divisão 2

Comparativo entre ABNT/IEC e NEC/API

1.8.3.1 *CLASSES E GRUPOS DAS ÁREA DE RISCO*

- ***Classes*** – Referem-se à natureza da mistura. O conceito de classes só é adotado pela norma NEC.
- ***Grupos*** – O conceito de grupo está associado à composição química da mistura.

Classe I – Gases ou vapores explosivos. Conforme o tipo de gás ou vapor, tem-se:

- GRUPO B – hidrogênio, butadieno, óxido de eteno;
- GRUPO C – éter etílico, etileno;
- GRUPO D – gasolina, nafta, solventes em geral.

Classe II – Poeiras combustíveis ou condutoras. Conforme o tipo de poeira, tem-se:

- GRUPO E;
- GRUPO F;
- GRUPO G.

Classe III – Fibras e partículas leves e inflamáveis.

De acordo com a norma ABNT/IEC, as regiões de risco são divididas em:

Grupo I – Para minas susceptíveis à liberação de grisú (gás a base de metano).
Grupo II – Para aplicação em outros locais. Sendo divididos em IIA, IIB eIIC.

Gases / Normas	Grupo de acetileno	Grupo de hidrogênio	Grupo de eteno	Grupo de propano
IEC	Gr II C	Gr II C	Gr II B	Gr II A
NEC/API	Classe I Gr A	Classe I Gr B	Classe I Gr C	Classe I Gr D

Correspondência entre ABNT/IEC e NEC/API

Atmosfera explosiva	IEC 7910	NEC	
Gases ou vapores	Zona 0 e Zona 1	Classe I	Divisão 1
	Zona 2	Classe I	Divisão 2
Poeiras	Zona 10 Zona 11	Classe II	Divisão 1 Divisão 1
Fibras	Zona 10 Zona 11	Classe III	Divisão 1 Divisão 2

Classificação de áreas conforme IEC e NEC

1.8.3.2 *CONSIDERAÇÃO PARA O MOTOR CC*

O motor CC apresenta a desvantagem de possuir uma fonte de faíscas (comutador), que podem ocasionar a ignição de materiais inflamáveis. É desaconselhável a utilização de motores em ambiente cuja presença na atmosfera perigosa é constante (Divisão I – IEC/ABNT), utilizando-os apenas onde a presença é ocasional (Divisão II – IEC/ABNT).

Em áreas com material inflamável pertence à classe II ou III da norma, podemos utilizar motores com ventilação por dutos.

Para estes casos, aconselhamos consultar a WEG Indústrias Ltda, Divisão Máquinas.

1.8.4 *CLASSES DE TEMPERATURA*

A temperatura máxima na superfície exposta do equipamento elétrico deve ser sempre menor que a temperatura de ignição do gás ou vapor. Os gases podem ser classificados para as classes de temperatura de acordo com sua temperatura de ignição, por meio do qual a máxima temperatura de superfície da respectiva classe, deve ser menor que a temperatura dos gases correspondentes.

IEC		NEC		Temperatura de ignição dos gases e/ou vapores
Classes de temperatura	Temperatura máxima de superfície	Classes de temperatura	Temperatura máxima de superfície	
T1	450	T1	450	> 450
T2	300	T2	300	> 300
		T2A	280	> 280
		T2B	260	> 260
		T2C	230	> 230
		T2D	215	> 215
T3	200	T3	200	> 200
		T3A	180	> 180
		T3B	165	> 165
		T3C	160	> 160
T4	135	T4	135	> 135
		T4A	120	> 120
T5	100	T5	100	> 100
T6	85	T6	85	> 85

Classes de temperatura

1.8.5 *EQUIPAMENTOS PARA ÁREAS DE RISCO*

Os ensaios e certificação desses equipamentos serão desenvolvidos pelo LABEX – Laboratório de Ensaio e Certificação de Equipamentos Elétricos com Proteção contra Explosão – que foi inaugurado em 16/12/1986 e pertence ao conglomerado laboratorial do Centro de Pesquisas Elétricas – CEPEL da Eletrobrás.

Tipo de proteção	Simbologia IEC/ABNT	Definição	Área de aplicação	Norma ABNT ou IEC
A prova de explosão	Ex(d)	Capaz de suportar explosão interna sem permitir que se propague para o meio externo	Zonas 1 e 2	IEC – 79.1 NBR – 5363
Segurança aumentada	Ex(e)	Medidas construtivas adicionais aplicadas a equipamentos que em condições normais de operação não produzem arco, centelha ou alta temperatura	Zonas 1 e 2	IEC – 79.7 NBR – 9883
Não acendível	Ex(n)	Dispositivo ou circuitos que apenas em condições normais de operação, não possuem energia suficiente para inflamar a atmosfera explosiva	Zona 2	IEC – 79.15
Invólucro hermético	Ex(h)	Invólucro com fechamento hermético (por fusão de material)	Zona 2	PROJ. IEC – 31 (N) 36

O quadro abaixo mostra a seleção dos equipamentos para as áreas classificadas de acordo com a norma ABNT/IEC 7914 ou VDE 0615. De acordo com a norma NEC, a relação dos equipamentos está mostrada no quadro abaixo:

IEC 7914 / VDE 0615	
Zona 0	• Ex – i ,ou outro equipamento, ambos especialmente aprovados para zona 0.
Zona 1	Equipamentos com tipo de proteção: • A prova de explosão Ex-d; • Presurização Ex-p; • Segurança intrínseca Ex-i; • Imersão em óleo Ex-o; • Segurança aumentada Ex-e; • Enchimento com areia Ex-s; • Encapsulamento Ex-m.
Zona 2	• Qualquer equipamento certificado para zona 0 ou 1; • Equipamentos para zona 2; • Não acendível Ex-n.

De acordo com a norma NEC, a relação dos equipamentos está mostrada no quadro abaixo:

Norma NEC	
Divisão 1	Equipamentos com tipo de proteção: • A prova de explosão serão para classe I Ex-d; • Presurização Ex-p; • Imersão em óleo Ex-o; • Segurança intrínseca Ex-i.
Divisão 2	• Qualquer equipamento certificado para divisão I; • Equipamentos incapazes de gerar faiscas ou superfícies quentes em invólucros de uso geral: não acendíveis.

1.8.6 *EQUIPAMENTOS DE SEGURANÇA AUMENTADA (PROTEÇÃOEX-E)*

É o equipamento elétrico que, sob condições de operação não produz arcos, faiscas ou aquecimento suficiente para causar ignição da atmosfera explosiva para o qual foi projetado.

Tempo t_E – tempo necessário para que um enrolamento de corrente alternada, que percorrido pela sua corrente de partida, atinja a sua temperatura limite, partindo da temperatura atingida em regime nominal, considerando a temperatura ambiente ao seu máximo. Abaixo, mostra-se os gráficos que ilustram como deve-se proceder a correta determinação do tempo "t_E".

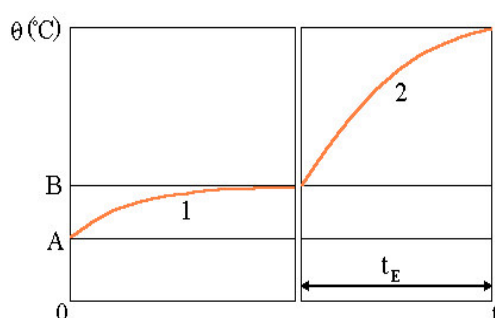



Figura 1.83 – Diagrama esquemático explicando o método de determinação do tempo "t_E"

Onde:
θ - temperatura ºC;
A – temperatura ambiente máxima;
B – temperatura em serviço nominal;
C – temperatura limite;
t – tempo;
0 – temperatura;
1 – elevação da temperatura;
2 – elevação da temperatura com rotor bloqueado.

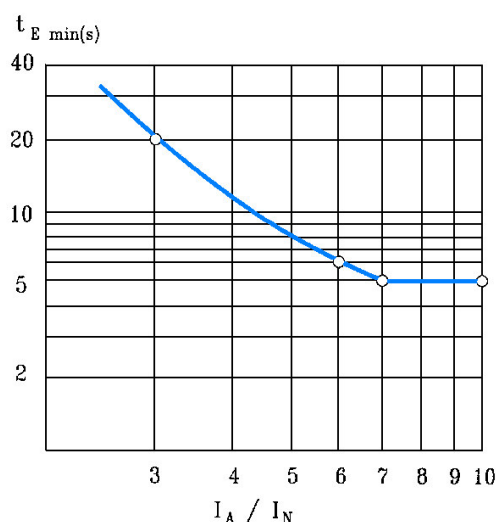



Figura 1.84 – Valor mínimo do tempo “t_E” em função da relação da corrente de arranque I_A/I_N

1.8.7 *EQUIPAMENTOS COM INVÓLUCROS A PROVA DE EXPLOSÃO (PROTEÇÃO EX-D)*

É um tipo de proteção em que as partes que podem inflamar uma atmosfera explosiva, são confinadas em invólucros que podem suportar a pressão durante uma explosão interna de uma mistura explosiva e que previne a transmissão da explosão para uma atmosfera explosiva.

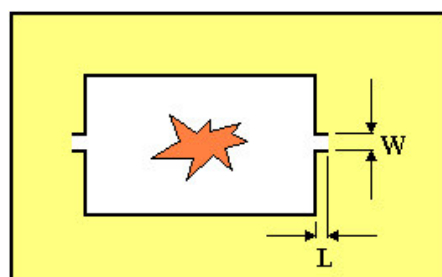



Figura 1.85 – Princípio da proteção Ex-d

O motor elétrico de indução (de qualquer proteção), não é estanque, ou seja, troca ar com o meio externo. Quando em funcionamento, o motor se aquece, o ar no seu interior fica com uma pressão maior que a externa (o ar é expelido); quando é desligada a alimentação, o motor se resfria e a pressão interna diminui, permitindo a entrada de ar (que neste caso está contaminado). A proteção Ex-d não permitirá que uma eventual explosão interna se propague ao ambiente externo. Para a segurança do sistema, a WEG controla os valores dos interstícios e as condições de acabamento das juntas, pois são responsáveis pelo volume de gases trocados entre o interior e exterior do motor.

Além de executar testes hidrostáticos em 100% das tampas, caixas de ligações e carcaças, com uma pressão quatro vezes maior que a verificada em testes realizados em laboratórios nacionais e internacionais de renome; realiza também testes de explosão provocada em institutos de pesquisa reconhecidos, como por exemplo o IPT de São Paulo.

1.9 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

1.9.1 *DIMENSÕES*

As dimensões dos motores elétricos WEG, são padronizadas de acordo com a NBR 5432, a qual, acompanha a International Electrotecnical Commission – IEC – 72. Nestas normas, a dimensão básica para a padronização das dimensões de montagem de máquinas elétricas, é a altura do plano da base ao centro da ponta do eixo, denominado de H (figura 1.86).

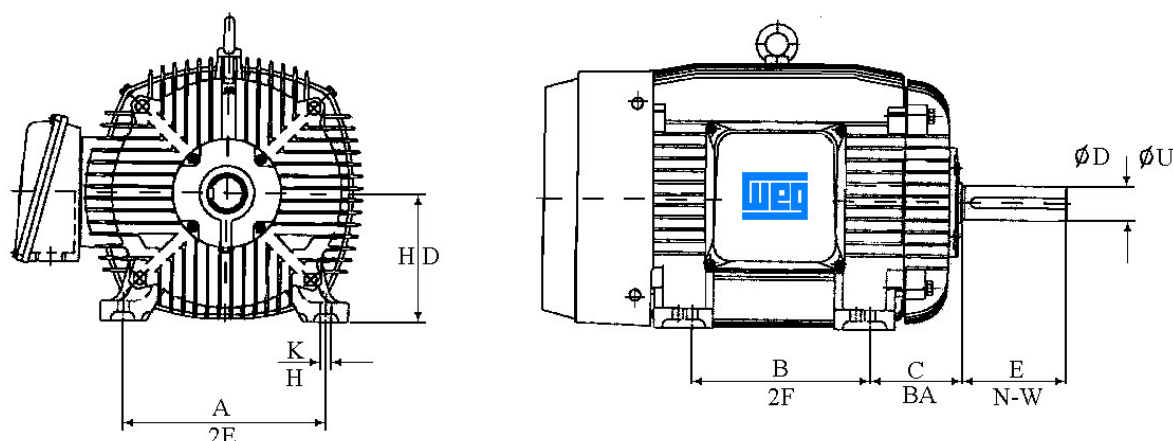



Figura 1.86

A cada altura de ponta de eixo H é associada uma dimensão C, distância do centro do furo dos pés do lado da ponta do eixo ao plano do encosto da ponta de eixo. A cada dimensão H, contudo, podem ser associadas várias dimensões B (dimensão axial da distância entre centros dos furos dos pés), de forma que é possível ter-se motores mais "longos" ou mais "curtos". A dimensão A, distância entre centros dos furos dos pés, no sentido frontal, é única para valores de H até 315, podem assumir múltiplos valores a partir da carcaça H, igual a 355mm.

Para clientes, que exigem carcaças padronizadas pela norma NEMA, a tabela 1.9.1.1, faz a comparação entre as dimensões H – A – C – K – D – E da ABNT/IEC e D – 2E – 2F – BA – H – U – NW da norma NEMA.

ABNT/IEC **NEMA**	**H** **D**	**A** **2E**	**B** **EF**	**C** **BA**	**K** **H**	**ϕ D** **ϕ U**	**E** **N–W**
63	63	100	80	40	7	11j6	23
71	72	112	90	45	7	14j6	30
80	80	125	100	50	10	19j6	40
90S **143T**	90 88,9	140 139,7	100 101,6	56 57,15	10 8,7	24j6 22,2	50 57,15

ABNT/IEC NEMA	H D	A 2E	B EF	C BA	K H	ϕ D ϕ U	E N–W
90L **145T**	90 88,9	140 139,7	125 127	56 57,15	10 8,7	24j6 22,2	50 57,15
100L	100	160	140	63	12	28j6	60
112S **182T**	112 114,3	190 190,5	114 114,3	70 70	12 10,3	28j6 28,6	60 69,9
112M **184T**	112 114,3	190 190,5	140 139,7	70 70	12 10,3	28j6 28,6	60 69,9
132S **213T**	132 133,4	216 216	140 139,7	89 89	12 10,3	38k6 34,9	80 85,7
132M **215T**	132 133,4	216 216	178 177,8	89 89	12 10,3	38k6 34,9	80 85,7
160M **254T**	160 158,8	254 254	210 209,6	108 108	15 13,5	42k6 41,3	110 101,6
160L **256T**	160 158,8	254 254	254 254	108 108	15 13,5	42k6 41,3	110 101,6
180M **284T**	180 177,8	279 279,4	241 241,3	121 121	15 13,5	48k6 47,6	110 117,5
180L **286T**	180 177,8	279 279,4	279 279,4	121 121	15 13,5	48k6 47,6	110 117,5
200M **324T**	200 203,2	318 317,5	267 267,7	133 133	19 16,7	55m6 54	110 133,4
200L **326T**	200 203,2	318 317,5	305 304,8	133 133	19 16,7	55m6 54	110 133,4
225S **364T**	225 228,6	356 355,6	286 285,6	149 149	19 19,0	60m6 60,3	140 149,2
225M **365T**	225 228,6	356 355,6	311 311,2	149 149	19 19,0	60m6 60,3	140 149,2
250S **404T**	250 254	406 406,4	311 311,2	168 168	24 20,6	65m6 73	140 184,2
250M **405T**	250 254	406 406,4	349 349,2	168 168	24 20,6	65m6 73	140 184,2
280S **444T**	280 279,4	457 457,2	368 368,4	190 190	24 20,6	75m6 85,7	140 215,9
280M **445T**	280 279,4	457 457,2	419 419,1	190 190	24 20,6	75m6 85,7	140 215,9
315S **504Z**	315 317,5	508 508	406 406,4	216 215,9	28 31,8	80m6 92,1	170 269,9
315M **505Z**	315 317,5	508 508	457 457,2	216 215,9	28 31,8	80m6 92,1	170 269,9
355M **586**	355 368,3	610 584,2	560 558,8	254 254	28 30	100m6 98,4	210 295,3
355L **587**	355 368,3	610 584,2	630 635	254 254	28 30	100m6 98,4	210 295,3

Tabela 1.9.1.1 – Comparação de dimensões ABNT/IEC e NEMA

1.9.2 *FORMAS CONSTRUTIVAS NORMALIZADAS*

Entende-se por forma construtiva, como sendo o arranjo das partes construtivas das máquinas com relação a sua fixação, a disposição de seus mancais e a ponta de eixo, que são padronizadas pela NBR 5031, IEC 34-7, DIN – 42950 e NEMA MG 1-1.03. A NBR 5432, determina que a caixa de ligação de um motor deve ficar situada de modo que a sua linha de

centro se encontre num setor compreendido entre o topo do motor e 10 graus abaixo da linha de centro horizontal desde, do lado direito, quando o motor for visto de lado do acionamento. O quadro seguinte, indica as diversas formas normalizadas.

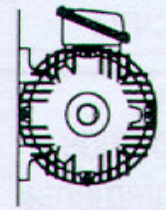
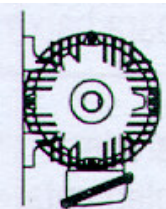
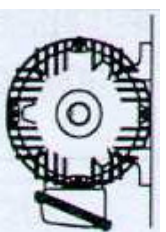
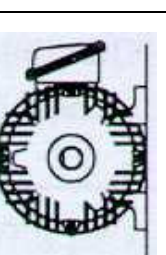
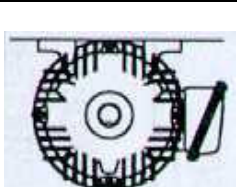
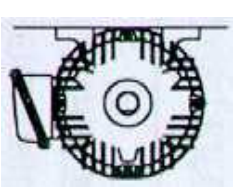
Figura	Símbolo para				Carcaça	Fixação ou montagem
	Designação WEG	DIN 42950	IEC 34 parte 7			
			Código I	Código II		
	B3D	B3	IM B3	IM1001	Com Pés	Montada sobre subestrutura (*)
	B3E					
	B5D	B5	IM B5	IM 3001	Sem Pés	Fixada pelo flange "FF"
	B5E					
	B35D	B3/B5	IM B35	IM 2001	Com Pés	Montada sobre subestrutura pelos pés, com fixação suplementar pelo flange "FF"
	B35E					
	B14D	B14	IM B14	IM 3601	Sem Pés	Fixada pelo flange "C"
	B14E					
	B34D	B3/B14	IM B34	IM 2101	Com Pés	Montado sobre subestrutura pelos pés, com fixação suplementar pelo flange "C"
	B34E					

	B6D	B6	IM B6	IM 1051	Com Pés	Montado em parede, pé à esquerda, olhando-se do lado do acionamento
	B6E					
	B7D	B7	IM B7	IM1061	Com Pés	Montado em parede, pé à direita, olhando-se do lado do acionamento
	B7E					
	B8D	B8	IM B8	IM 1071	Com Pés	Fixada no teto
	B8E					

Tabela 1.9.2.1 – Formas construtivas normalizadas (montagem horizontal).

(*) Subestrutura: bases, placa de base, fundações, trilhos, pedestais, etc.

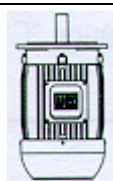
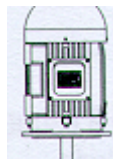
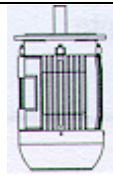
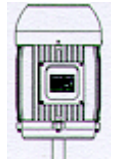
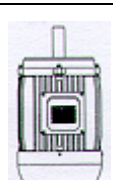
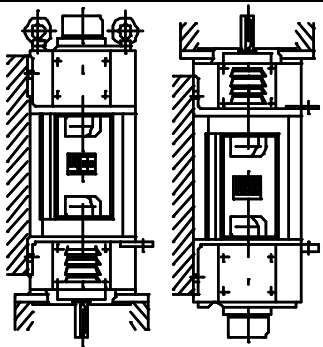
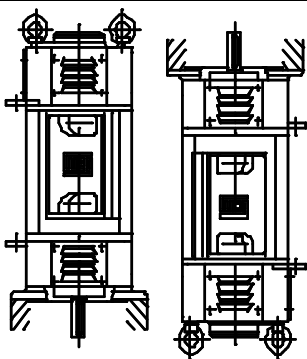
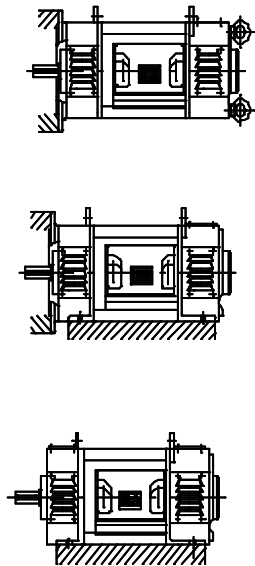



Figura	Símbolo para					Fixação ou montagem
	Designação WEG	DIN 42950	IEC 34 parte 7		Carcaça	
			Código I	Código II		
	V5	V5	IM V5	IM 1011	Com Pés	Montada em parede ou sobre subestrutura
	V6	V6	IM V6	IM 1031	Com Pés	Montada em parede ou sobre subestrutura
	V1	V1	IM V1	IM 3011	Sem Pés	Fixada pelo flange "FF", para baixo
	V3	V3	IM V3	IM 3031	Sem Pés	Fixada pelo flange "FF", para cima
	V15	V1 / V5	IM V15	IM 2011	Com Pés	Montada em parede, com fixação suplementar pelo flange "FF", para baixo
	V36	V3 / V6	IM V36	IM 2031	Com Pés	Montada em parede, com fixação suplementar pelo flange "FF", para cima
	V18	V18	IM V18	IM 3611	Sem Pés	Fixada pela face superior do flange "C", para baixo
	V19	V19	IM V19	IM 3631	Sem Pés	Fixada pela face superior do flange "C", para cima

Tabela 1.9.2.2 – Formas construtivas normalizadas (montagem vertical).

1.9.2.1 *FORMAS CONSTRUTIVAS DO MOTOR CC*

	V15, V36
	V1, V3
	B5 B35 B3

A identificação utilizada está de acordo com as normas DIN, IEC e ABNT. Devido ao formato especial dos pólos principais, manteve-se baixa a reação da armadura e, consequentemente, a distorção do campo do entreferro.

Todas as carcaças são soldadas sob pressão através de 4 barras de aço chato a sólidos anéis laterais nos dois lados, e que são usinados para encaixe das tampas de ferro fundido.

Nos modelos DC(N)E, três lados da carcaça recebem aletas de alumínio, para dissipação do calor. Acima da carcaça 311 todas as máquinas são fornecidas com pés, também nos tipos flangeadas com trocador de calor é necessário uma fixação com pés adicionais.

1.9.3 *MOTORES COM FLANGE*

Conforme a norma NBR 5432, os flanges podem ser de dois tipos diferentes:

- Com furos passantes, designados flanges FF;
- Com furos rosqueados, designados flanges FT ou flange C.

Os flanges FF, FT ou C, devem ter quatro ou oito furos, espaçados sistematicamente. Os flanges FF e FT, da norma NBR 5432, são similares aos flanges FF e FT da norma IEC 72.1. A seguir, apresenta-se as dimensões dos flanges mais utilizados.

Dimensões do Flange:

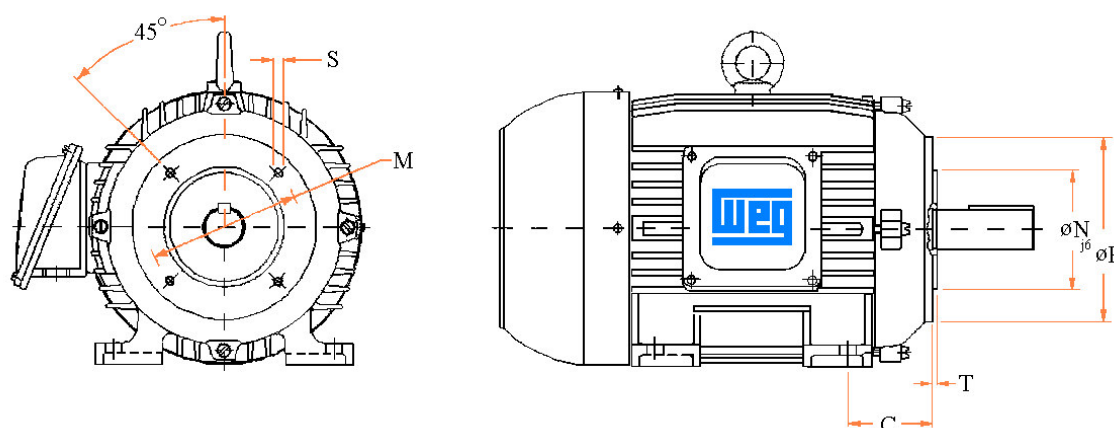



Figura 1.87

<table>
<tr><th rowspan="2">Carcaça IEC</th><th colspan="7">Dimensões do flange tipo “C” DIN 42677</th><th rowspan="2">Quantidade de Furos</th></tr>
<tr><th>Flange</th><th>C</th><th>ϕ M</th><th>ϕ N</th><th>ϕ P</th><th>S</th><th>T</th></tr>
<tr><td>63</td><td>C 90</td><td>40</td><td>75</td><td>60</td><td>90</td><td>M 5</td><td rowspan="2">2,5</td><td rowspan="10">4</td></tr>
<tr><td>71</td><td>C105</td><td>45</td><td>85</td><td>70</td><td>105</td><td rowspan="2">M 6</td></tr>
<tr><td>80</td><td>C120</td><td>50</td><td>100</td><td>80</td><td>120</td><td rowspan="3">3</td></tr>
<tr><td>90S</td><td rowspan="2">C140</td><td rowspan="2">56</td><td rowspan="2">115</td><td rowspan="2">95</td><td rowspan="2">140</td><td rowspan="4">M 8</td></tr>
<tr><td>90L</td></tr>
<tr><td>100L</td><td rowspan="2">C160</td><td>63</td><td rowspan="2">130</td><td rowspan="2">110</td><td rowspan="2">160</td><td rowspan="4">3,5</td></tr>
<tr><td>112M</td><td>70</td></tr>
<tr><td>132S</td><td rowspan="2">C200</td><td rowspan="2">89</td><td rowspan="2">165</td><td rowspan="2">130</td><td rowspan="2">200</td><td rowspan="2">M 10</td></tr>
<tr><td>132M</td></tr>
</table>

Figura 1.88

<table>
<tr><th rowspan="2">Carcaça IEC</th><th colspan="7">Dimensões do flange tipo “C” DIN 42677</th><th rowspan="2">Quantidade de Furos</th></tr>
<tr><th>Flange</th><th>C</th><th>ϕ M</th><th>ϕ N</th><th>ϕ P</th><th>S</th><th>T</th></tr>
<tr><td>63</td><td rowspan="3">FC 95</td><td>40</td><td rowspan="3">95,2</td><td rowspan="3">76,2</td><td rowspan="3">143</td><td rowspan="3">¼” 20 UNC</td><td rowspan="6">4</td><td rowspan="15">4</td></tr>
<tr><td>71</td><td>45</td></tr>
<tr><td>80</td><td>50</td></tr>
<tr><td>90S</td><td rowspan="3">FC 149</td><td rowspan="2">56</td><td rowspan="3">149,2</td><td rowspan="3">114,3</td><td rowspan="3">165</td><td rowspan="3">3/8” 16 UNC</td></tr>
<tr><td>90L</td></tr>
<tr><td>100L</td><td>63</td></tr>
<tr><td>112M</td><td rowspan="5">FC 184</td><td>70</td><td rowspan="5">184,2</td><td rowspan="5">215,9</td><td rowspan="5">225</td><td rowspan="9">½” 13 UNC</td><td rowspan="17">6,3</td></tr>
<tr><td>132S</td><td rowspan="2">89</td></tr>
<tr><td>132M</td></tr>
<tr><td>160M</td><td rowspan="2">108</td></tr>
<tr><td>160L</td></tr>
<tr><td>180M</td><td rowspan="4">FC 228</td><td rowspan="2">121</td><td rowspan="4">228,6</td><td rowspan="4">266,7</td><td rowspan="4">280</td></tr>
<tr><td>180L</td></tr>
<tr><td>200M</td><td rowspan="2">133</td></tr>
<tr><td>200L</td></tr>
<tr><td>225S</td><td rowspan="2">FC 279 C</td><td rowspan="2">149</td><td rowspan="2">279,4</td><td rowspan="2">317,5</td><td rowspan="2">395</td><td rowspan="8">5/8” 11 UNC</td><td rowspan="8">8</td></tr>
<tr><td>225M</td></tr>
<tr><td>250S</td><td rowspan="4">FC 355</td><td rowspan="2">168</td><td rowspan="4">355,6</td><td rowspan="4">406,4</td><td rowspan="4">455</td></tr>
<tr><td>250M</td></tr>
<tr><td>280S</td><td rowspan="2">190</td></tr>
<tr><td>280M</td></tr>
<tr><td>315S</td><td rowspan="2">FC 368</td><td rowspan="2">216</td><td rowspan="2">368,3</td><td rowspan="2">419,1</td><td rowspan="2">455</td></tr>
<tr><td>315M</td></tr>
</table>

Figura 1.89

Carcaça IEC	Dimensões do flange tipo "C" DIN 42677									Quantidade de Furos
	Flange	**C**	**LA**	**ϕ M**	**ϕ N**	**ϕ P**	**T**	**S**	**α**	
63	FF 115	40	9	115	95	140	3	10	45°	4
71	FF 130	45	9	130	110	160	3,5			
80	FF 165	50	10	165	130	200		12		
90S		56								
90L										
100L	FF 215	63	11	215	180	250	4	15		
112M		70								
132S	FF 265	89	12	265	230	300				
132M										
160M	FF 300	108	8	300	250	350	5	19		
160L										
180M		121								
180L										
200M	FF 350	133							22°30'	8
200L										
225S	FF 400	149		400	350	450				
225M										
250S	FF 500	168		500	450	550				
250M										
280S		190								
280M										
315S	FF 600	216	22	600	550	660	6	24		
315M										
355M	FF 740	254	22	740	680	800				
355L										

1.9.4 *PINTURA*

O plano de pintura abaixo, apresenta as soluções que são adotadas para cada aplicação.

Uso recomendado	Plano	Composição	Norma Operacional
Ambiente normal, levemente severo abrigado ou desabrigado, para uso industrial, com baixa umidade relativa, variações normais de temperatura e presença de SO2. Nota:Não recomendado para exposição direta a vapores ácidos, álcalis e solventes.	201	• Fundo: 1 demão com 20 a 55µm de primer sintético alquídico; • Acabamento: 1 demão com 20 a 55µm de tinta esmalte sintético alquídico.	TOP – 1901E
Ambiente industrial severo em locais abrigados ou desabrigados, podendo conter presença de SO2, vapores e contaminantes sólidos e alta umidade. Indicado para aplicação em indústrias de papel e celulose, mineração, química e petroquímica. Nota: Atende a Norma Petrobrás N1736, condição 3.	202	• Fundo: 1 demão com 20 a 55µm de premier sintético alquídico por imersão; • Intermediário: 1 demão com 20 a 40µm de epóxi isocianato; • Acabamento: 1 demão com 100 a 140µm de acabamento epóxi poliamida alta espessura.	TOP – 2248E
Ambiente marítimo agressivo ou industrial marítimo, abrigado ou desabrigado, podendo conter alta umidade, indicado para aplicação em indústrias de papel e celulose, mineração, química e petroquímica. Nota: Atende a Norma Petrobrás N1736 (condição 4) e N1374.	204	• Fundo: 1 demão com 60 a 100µm de premier etil silicato de zinco; • Intermediário: 1 demão com 120 a 140µm de tinta premier epóxi poliamida alta espessura; • Acabamento: 2 demãos com 80 a 100µm cada, de acabamento poliuretano alifático alta espessura.	TOP – 552E
Ambiente normal, levemente severo e abrigado, para uso Doméstico, com baixa umidade relativa, variações normais de temperatura. Nota: Não recomendado para exposição direta a vapores ácidos, álcalis e solventes	207	• Fundo: 1 demão com 15 a 35µm de primer nitrocelulose. • Acabamento: 1 demão com 30 à 45µm de acabamento nitrocelulose.	--

1.9.5 *VIBRAÇÃO*

A vibração de uma máquina elétrica está intimamente relacionada com sua montagem e por isso é geralmente desejável efetuar as medições de vibração nas condições reais de instalação e funcionamento. Contudo, para permitir a avaliação do balanceamento e da vibração de máquinas elétricas girantes, é necessário efetuar tais medições com a máquina desacoplada, sob condições de ensaio determinadas pelos itens abaixo, de forma a permitir a reprodutividade dos ensaios e obtenção de medidas comparáveis.

1.9.5.1 *SUSPENSÃO LIVRE*

Esta condição é obtida pela suspensão da máquina por uma mola ou pela montagem desta máquina sobre um suporte elástico (molas, borrachas, etc.). A deformação da base elástica em função da rotação da máquina deve ser no mínimo igual aos valores da tabela 1.9.5.1.1.

A massa efetiva do suporte elástico não deve ser superior a 1/10 daquela da máquina a fim de reduzir a influência a massa e dos momentos de inércia das partes do suporte elástico sobre o nível de vibração medido.

Rotação nominal (rpm)	Deformação da base elástica (mm)
3600	1,0
1800	4,5
1200	10
900	18

Tabela 1.9.5.1.1

1.9.5.2 *CHAVETA*

Para o balanceamento a medição da severidade de vibração de máquinas com o rasgo de chaveta na ponta de eixo, este rasgo deve ser preenchido com meia chaveta, recortada de maneira a preenchê-lo até a linha divisória entre o eixo e o elemento a ser acoplado.

Nota: uma chaveta retangular de comprimento idêntico ao da chaveta utilizada na máquina em funcionamento normal e meia altura normal (que deve ser centrada no rasgo de chaveta a ser utilizado são aceitáveis como práticas alternativas.

1.9.5.3 *PONTOS DE MEDIÇÃO*

As medições da severidade de vibração devem ser efetuadas sobre os mancais, na proximidade do eixo, em três direções perpendiculares, com a máquina funcionando na posição que ocupa sob condições normais (com eixo horizontal ou vertical).

A localização dos pontos de medição e as direções a que se referem os níveis da severidade de vibração estão indicadas na figura 1.90.

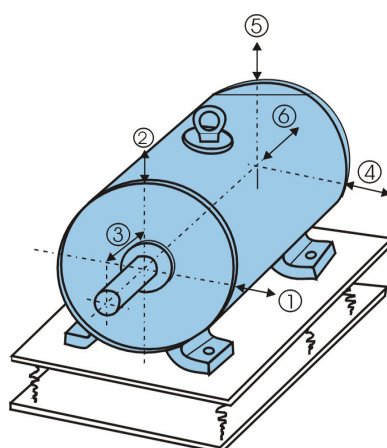



Figura 1.90 – Pontos de medição de vibração

A tabela 1.9.5.3.1 indica valores admissíveis para a máxima velocidade de vibração para as carcaças IEC 56 a 400, para balanceamento normal, reduzido e especial.

Balanceamento	Velocidade	Máximo valor eficaz da velocidade de vibração para a altura H do eixo		
	Rpm da máquina	56 a 132	160 a 225	250 a 400
		mm/s	mm/s	mm/s
N (normal)	600 a 1800 1800 a 3600	1,8 1,8	1,8 2,8	2,8 4,5
R (reduzida)	600 a 1800 1800 a 3600	0,71 1,12	1,12 1,8	1,8 2,8
S (especial)	600 a 1800 1800 a 3600	0,45 0,71	0,71 1,12	1,12 1,8

Tabela 1.9.5.3.1 – Limites recomendados para severidade de vibração, conforme NBR 11390 e IEC 34-14

Notas:

- Para valores de pico multiplicar os valores da tabela por $\sqrt{2}$.
- Os valores da tabela acima são válidos para medições realizadas com a máquina a vazio e desacoplada, funcionando na freqüência e tensão nominais.
- Para máquinas que giram nos dois sentidos, os valores da tabela se aplicam a ambos os sentidos.
- A tabela acima não se aplica a máquinas montadas no local de instalação (ver ISO 3945 e ISO 2372), motores trifásicos com comutador, motores monofásicos, motores trifásicos com alimentação monofásica ou a máquinas acopladas a suas máquinas de acionamento ou cargas acionadas.

A tabela 1.9.5.3.2 indica os valores para a máxima velocidade de vibração para as carcaças NEMA 42 a 587, com balanceamento normal conforme norma NEMA MGI-7.08 (1993).

Rotação nominal (rpm)	Máximo valor eficaz da velocidade de vibração (mm/s)
3600	2,7
1800	2,7
1200	2,7
900	2,1
720	1,6
600	1,4

Tabela 1.9.5.3.2

Obs.: as notas anteriores da tabela 1.9.5.3.1, são também válidas.

1.9.6 *BALANCEAMENTO*

1.9.6.1 *DEFINIÇÃO*

Conforme a NBR 8008, balanceamento é o processo que procura melhorar a distribuição de massa de um corpo, de modo que este gire em seus mancais sem forças de desbalanceamento.

1.9.6.2 *TIPOS DE BALANCEAMENTO*

As principais aplicações por tipo de balanceamento, são apresentadas na tabela 1.9.6.2.1.

Balanceamento	Tipo de máquina
Normal (N)	• Máquinas sem requisitos especiais, tais como: máquinas gráficas, laminadores, bitadores, bombas centrífugas, máquinas têxteis, transportadores, etc.
Reduzido (R)	• Máquinas de precisão para trabalho sem vibração, tais como: máquinas a serem instaladas sobre fundamento isolado a prova de vibração, mandriladoras e fresadoras de precisão, tornos, furadeiras de coordenadas, etc.
Especial (S)	• Máquinas para trabalho de alta precisão, tais como: retificas, balanceadoras, mandriladora de coordenadas, etc.

Tabela 1.9.6.2.1 – Tipos de balanceamento

Figura 1.91 – Balanceamento de Baixa Tensão

1.9.7 *ATERRAMENTO*

1.9.7.1 *FINALIDADE DO ATERRAMENTO*

O aterramento visa proteger os operadores e as máquinas acionadas, contra possíveis curto-circuitos, entre a parte energizada e a carcaça do motor.

1.9.7.2 *BITOLAS MÍNIMAS DE CONDUTORES DE ATERRAMENTO*

A fixação do condutor de aterramento, é através de parafuso ou conector, identificado no motor por este símbolo (⏚).

A resistência de aterramento deve estar de acordo com a NBR 5410.

Potências		II pólos 3600 rpm	IV pólos 1800 rpm	VI pólos 1200 rpm	VIII pólos 900 rpm
Cv	**kW**	**Bitola mm²**	**Bitola mm²**	**Bitola mm²**	**Bitola mm²**
Até 10	Até 7,5	4	4	4	6
12,5	9	6	6	6	6
15	11	6	6	6	6
20	15	10	10	10	10
25	18,5	10	10	10	16
30	22	16	16	16	16
40	30	16	16	16	16
50	37	25	25	25	25
60	45	25	25	25	25
75	55	35	35	35	35
100	75	35	35	35	70
125	90	70	70	70	70
150	110	70	70	70	70
200	150	70	70	70	70
250	185	70	70	70	70
300	220	70	70	70	70
350	250	70	70	70	70
400	275	70	70	70	---
450	330	70	70	70	---
500	365	---	70	---	---

Tabela 1.9.7.2.1

1.9.8 *ELEMENTOS DE TRANSMISSÃO*

Os elementos de transmissão, tais como, polias, acoplamentos, etc., precisam ser balanceados dinamicamente antes de serem instalados, e devem estar perfeitamente alinhados entre si, conforme figura 1.92.

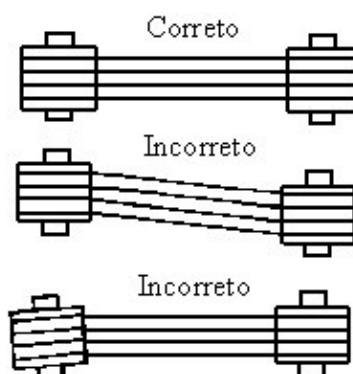



Figura 1.92 – Correto alinhamento das polias

Correias que trabalham lateralmente enviesadas transmitem batidas de sentido alternante ao rotor, e poderão danificar os encostos do mancal. O escorregamento da correia poderá ser evitado com aplicação de um material resinoso, como o breu, por exemplo.

A tensão na correia deverá ser apenas suficiente para evitar o escorregamento no funcionamento.

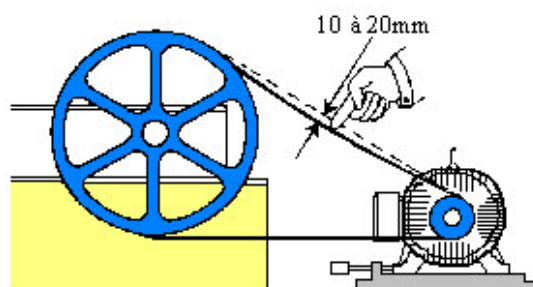



Figura 1.93 – Tensões na correia

Deve ser evitado o uso de polias demasiadamente pequenas; estas provocam flexões do motor devido ao fato que a tração na correia aumenta à medida que diminui o diâmetro da polia.

Quando for utilizado um acoplamento por meio de polias e correias, deve-se observar:

- As correias devem ser esticadas apenas o suficiente par evitar deslizamento no funcionamento;
- diâmetro mínimo das polias não deve ser inferior ao da tabela 1.9.8.1;
- Havendo necessidade de aplicação de pólos com diâmetro menores que as da tabela 1.9.8.1, em outras potências e polaridades, consultar a Rede de Assistência Técnica WEG mais próxima.

DIÂMETRO PRIMITIVO MÍNIMO DE POLIAS							
	ROLAMENTO DE ESFERAS						
Carcaça	Rolamento	MEDIDA X (mm)					
		20	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**
63	6201-Z	40	---	---	---	---	---
71	6203-Z	40	40	---	---	---	---
80	6204-Z	40	40	---	---	---	---
90	6205-Z	63	71	80	---	---	---
100	6206-Z	71	80	90	---	---	---
112	6307-Z	71	80	90	---	---	---
132	6308-Z	---	100	112	125	---	---
160	6309	---	140	160	180	200	---
180	6311	---	---	160	180	200	224
200	6312	---	---	200	224	250	280

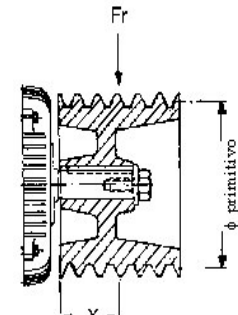



Tabela 1.9.8.1

Carcaça	Pólos	ROLAMENTO DE ESFERAS				
		Rolamento	MEDIDA X (mm)			
			50	**80**	**110**	**140**
225	IV-VI-VIII	6314	250	265	280	300
250	IV-VI-VIII	6314	375	400	425	450
280	IV-VI-VIII	6316	500	530	560	600
315	IV-VI-VIII	6319	-----	-----	-----	-----
355	IV-VI-VIII	6322	-----	-----	-----	-----

Tabela 1.9.8.2

Importante:

- Velocidades periféricas para polias cheias em ferro fundido cinzento FE 20 é v=35m/s;
- Utilizar polias de aço quando a velocidade periférica for maior que 35 m/s;

- Para correias em "V" a velocidade não deve ultrapassar 30 m/s.

1.9.8.1 *ESFORÇOS AXIAIS E RADIAIS*

Os esforços axiais máximos admitidos sobre os mancais dos motores WEG, até a carcaça 355, estão na tabela 1.9.8.1.1.

CARGA MÁXIMA AXIAL ADMISSÍVEL (kgf) – f = 60 Hz																
MOTORES TOTALMENTE FECHADOS IP 54																
Carcaça	POSIÇÃO / FORMA CONSTRUTIVA															
	II	IV	VI	VIII	II	IV	VI	VIII	II	IV	VI	VIII	II	IV	VI	VIII
63	28	37	43	----	28	37	43	----	27	35	42	----	27	35	42	----
71	30	41	48	54	37	50	59	66	29	39	46	53	36	49	57	65
80	36	49	57	65	48	66	77	86	34	46	54	62	47	63	74	84
90	46	63	76	85	50	68	84	94	43	58	72	80	47	64	79	89
100	49	67	81	92	70	95	115	130	44	60	74	85	65	89	109	123
112	69	93	113	130	122	166	201	227	62	84	104	121	116	157	191	218
132	85	118	141	160	145	202	241	271	72	103	123	139	133	186	222	250
160	122	168	192	221	208	280	324	369	97	141	159	192	183	253	291	340
180	----	222	254	287	-----	379	439	494	----	186	203	236	-----	344	388	445
200	170	225	271	310	319	421	499	566	122	161	208	252	271	355	436	508
225	406	538	632	712	406	538	632	712	340	454	540	620	340	454	540	620
250	397	528	617	696	397	528	617	696	319	425	497	576	319	425	497	576
280	382	608	721	814	382	608	721	814	259	451	541	636	259	451	541	636
315	349	567	675	766	349	567	675	766	161	327	400	493	161	327	400	493
355	318	638	748	846	318	638	748	846	46	215	249	271	46	215	249	271

Tabela 1.9.8.1.1

Instruções para utilização dos gráficos:

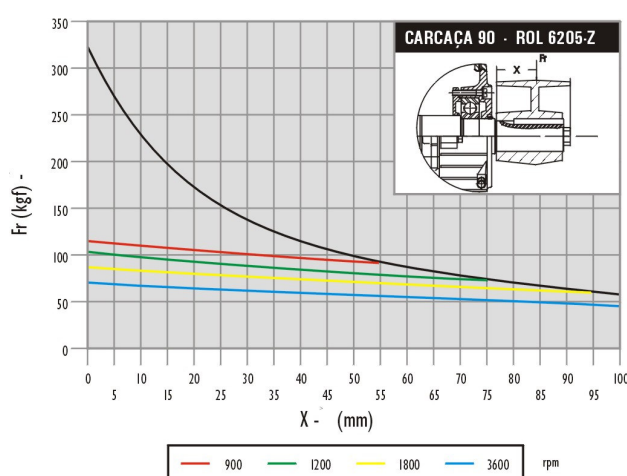



Figura 1.95 – Carcaça 90

1 – Carga máxima radial sobre o eixo;
2 – Carga máxima radial sobre os rolamentos;

Onde: X – Metade da largura da polia (mm);
F_r – Força máxima radial em função do diâmetro e da largura da polia.

Exemplo:

Verificar se o motor 4cv, II pólos, 60Hz, suporta um esforço radial de 50kfg, sendo a largura de polia de 100mm.

Carcaça: 90L;
Fr: 50kgf;
X: 50mm;

1. Marcar a distância X;
2. Encontrar a linha n=3600 do rolamento:

Verifica-se que este rolamento suporta uma carga radial de 50kgf.

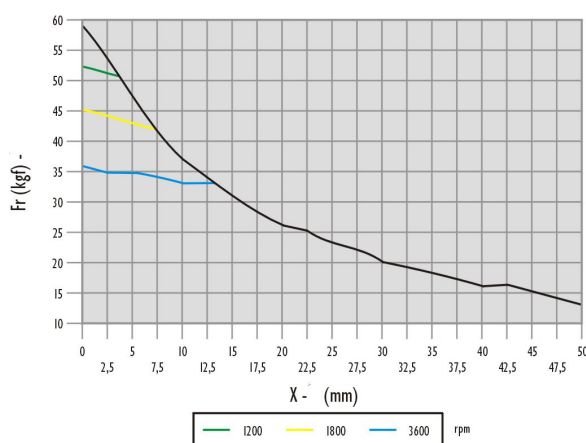



Figura 1.96 – Carcaça 63

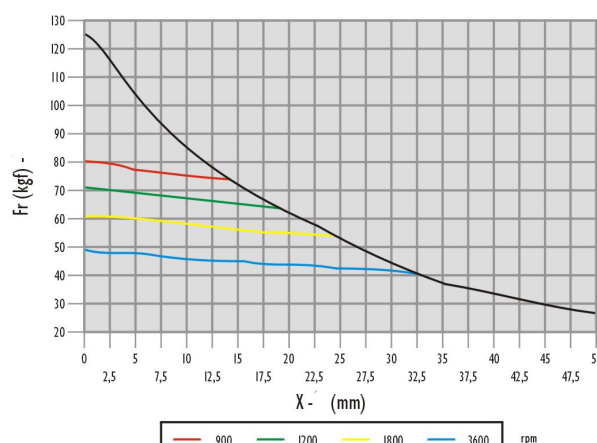



Figura 1.97 – Carcaça 71

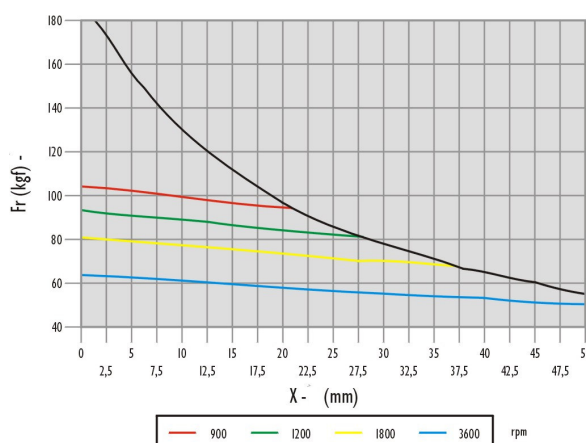



Figura 1.98 – Carcaça 80

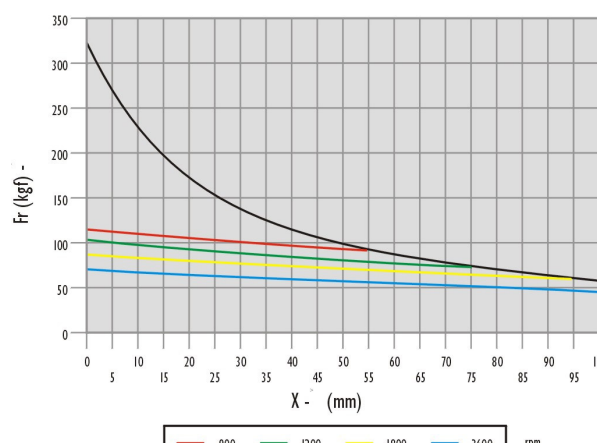



Figura 1.99 – Carcaça 90

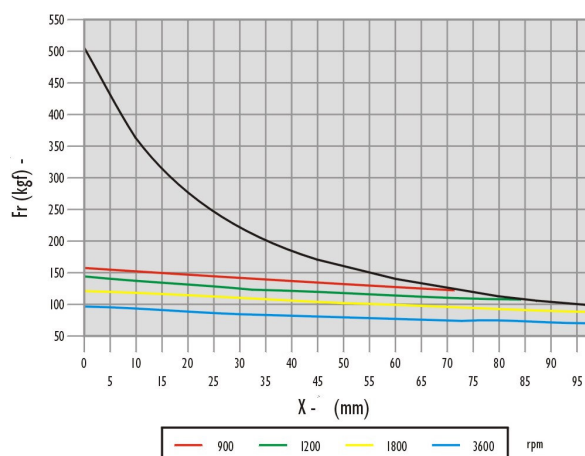



Figura 1.100 – Carcaça 100

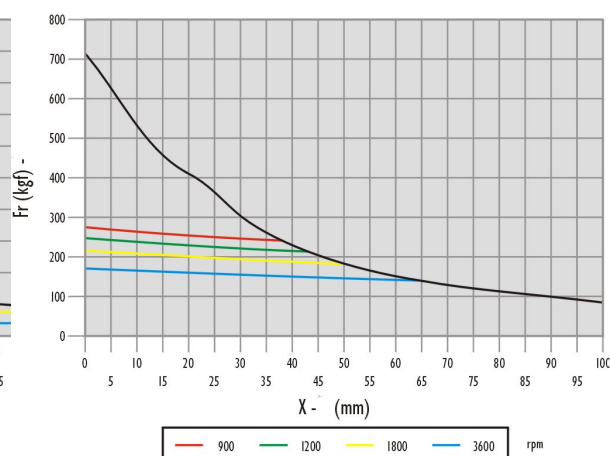



Figura 1.101 – Carcaça 112

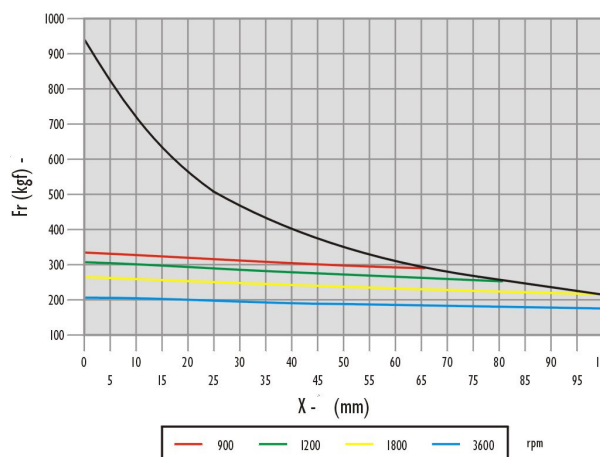



Figura 1.102 – Carcaça 132

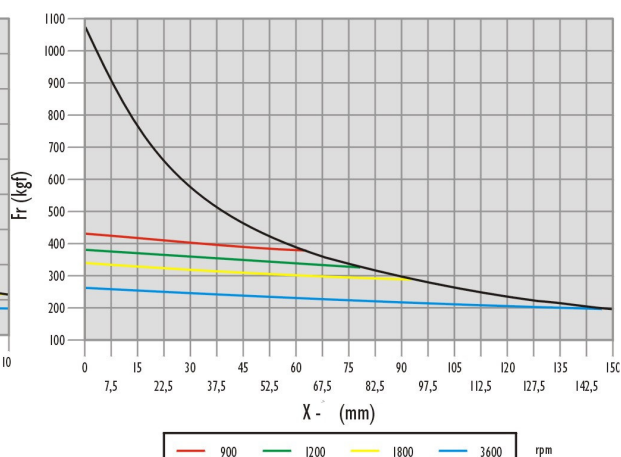



Figura 1.103 – Carcaça 160

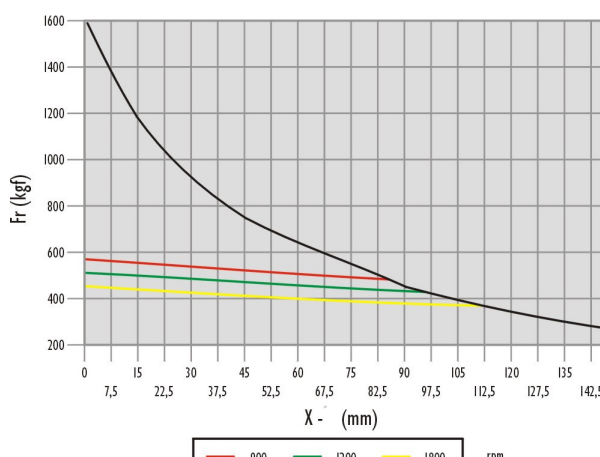



Figura 1.104 – Carcaça 180

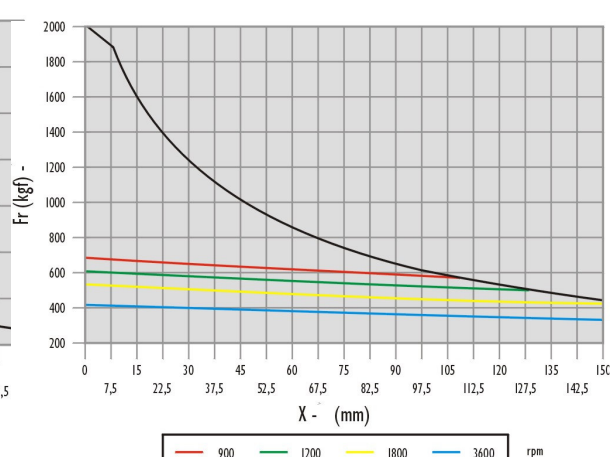



Figura 1.105 – Carcaça 200

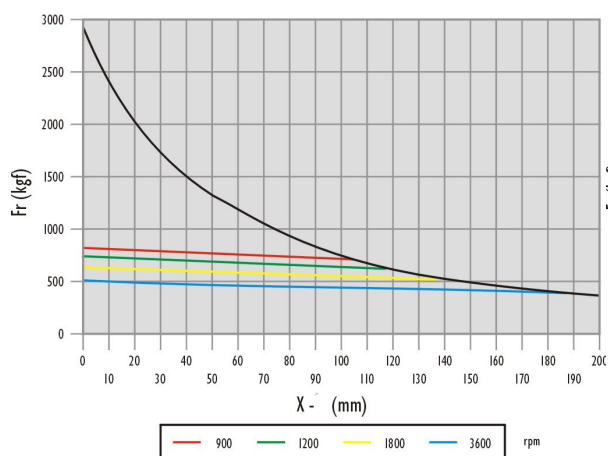



Figura 1.106 – Carcaça 225

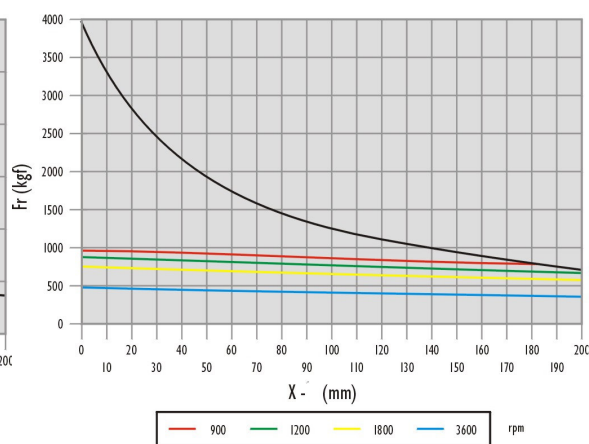



Figura 1.107 – Carcaça 250

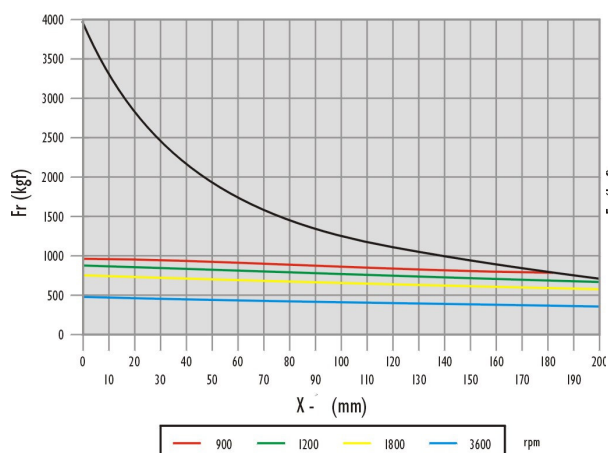



Figura 1.108 – Carcaça 280

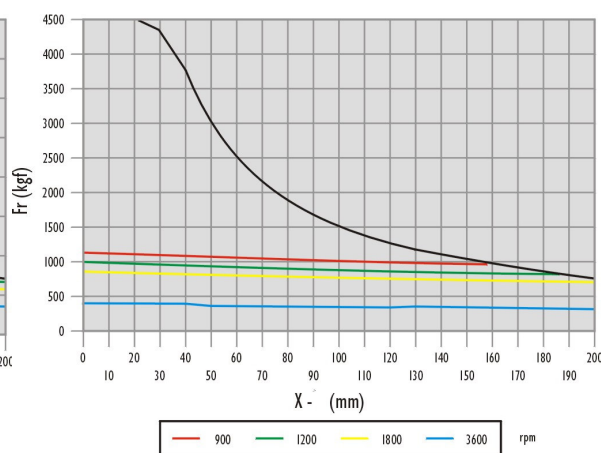



Figura 1.109 – Carcaça 315

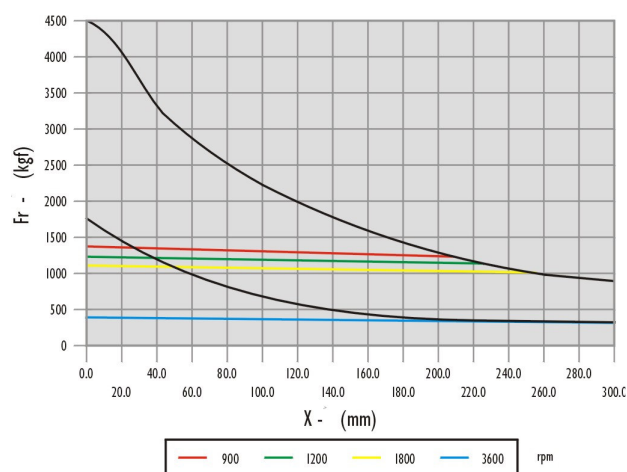



Figura 1.110 – Carcaça 355

1.9.8.2 CÁLCULO DA FORÇA RADIAL EM ACOPLAMENTO POR POLIAS E CORREIAS

Para calcular a força radial (F_r) imposta ao mancal de um motor elétrico acionado a carga através de polias e correias, utiliza-se a seguinte expressão prática:

$$F_r = \frac{2 \times 716200 \times P(cv)}{D_{pmot} \times n} \times \sqrt{\frac{K^2 \times (1 - \cos\alpha) + 1{,}21 \times (1 + \cos\alpha)}{2}}$$

$$K = 1{,}1 \times \left(\frac{e^{\mu * \alpha} + 1}{e^{\mu * \alpha} - 1} \right) \qquad \alpha = \pi - \left(\frac{D_{pmov} - D_{pmot}}{d_{ee}} \right)$$

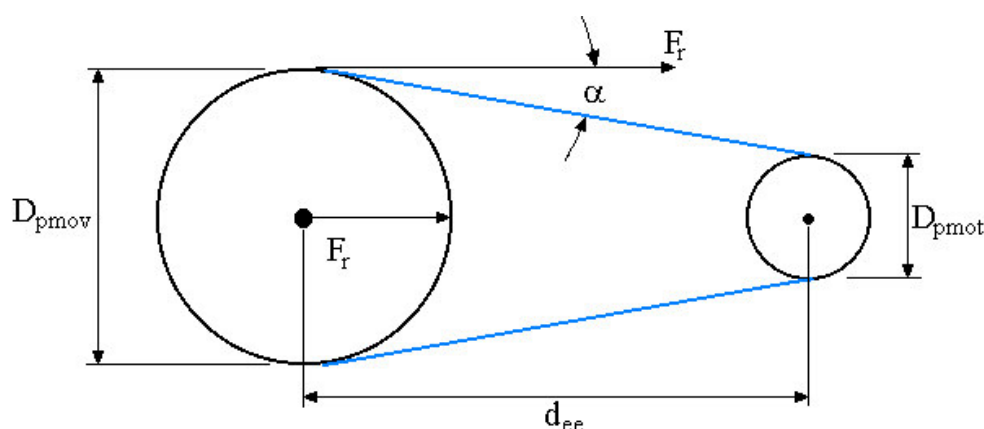
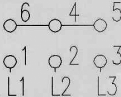



Figura 1.111

Onde:
F_r – força radial em kgf;
P – potência em cv;
n – rotação em rpm;
D_{pmot} – diâmetro da polia motora em mm;
α - ângulo de contato na polia em radianos;
μ - coeficiente de atrito na polia (0,5 para polias em “V” e 0,17 para polias lisas;
D_{pmov} – diâmetro da polia movida;
d_{ee} – distância entre centros (entre polia movida e motora).

1.9.9 PLACA DE IDENTIFICAÇÃO

A placa de identificação contém as informações que determinam as características nominais e de desempenho dos motores que são definidas pela NBR 7094.

1.9.9.1 *MOTOR DE BAIXA TENSÃO CA*

1.10 SELEÇÃO E APLICAÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS

Na engenharia de aplicação de motores é comum e, em muitos casos práticos, comparar as exigências da carga com as características do motor.

Existem muitas aplicações que podem ser corretamente acionadas por mais de um tipo de motor, e a seleção de um determinado tipo, nem sempre exclui o uso de outros tipos.

Com o advento do computador, o cálculo pode ser aprimorado, obtendo-se resultados precisos que resultam em máquinas dimensionadas de maneira mais econômica.

Os motores de indução WEG, de gaiola ou de anel, de baixa e média tensão, encontram vasto campo de aplicação, notadamente nos setores de siderurgia, mineração, papel e celulose, saneamento, químico e petroquímico, cimento entre outros, tornando-se cada vez mais importante a seleção do tipo adequado para cada aplicação.

A seleção do tipo adequado de motor, com respeito ao tipo, conjugado, fator de potência, rendimento e elevação de temperatura, isolação, tensão e grau de proteção mecânica, somente pode ser feita, após uma análise cuidadosa, considerando parâmetros como: custo inicial, capacidade da rede, necessidade da correção do fator de potência, conjugados requeridos, efeito da inércia da carga, necessidade ou não de regulação de velocidade, exposição da máquina em ambientes úmidos, poluídos e/ou agressivos.

O motor assíncrono de gaiola é o mais empregado em qualquer aplicação industrial, devido a sua construção robusta e simples, além de ter a solução mais econômica, tanto em termos de motores como de comando e proteção. O meio mais adequando na atualidade para reduzir os gastos de energia é usar motores WEG da linha Alto Rendimento Plus. Está comprovado, por testes, que estes motores especiais têm até 30% a menos de perdas, o que significa uma real economia. Estes motores são projetados e construídos com a mais alta tecnologia, com o objetivo de reduzir perdas e incrementar o rendimento. Isto proporciona baixo consumo de energia e menor despesa. São os mais adequados nas aplicações com variação de tensão. São testados de acordo com a norma NBR 5383 e seus valores de rendimento certificados e estampados na placa de identificação do motor. A técnica de ensaio é o método B da IEEE 112. Os valores de rendimento são obtidos através do método de separação de perdas de acordo com a NBR 5383-128. Os motores de alto rendimento, série Plus, são padronizados conforme as normas IEC, mantendo a relação potência/carcaça, sendo portanto, intercambiáveis com todos os motores normalizados existentes no mercado. Embora de custo mais elevado que o motor de gaiola, aplicação de motores de anéis, é necessária para partidas pesadas (elevada inércia), acionamento de velocidade ajustável ou quando é necessário limitar a corrente de partida mantendo um alto conjugado de partida.

Tipo	**Motor de indução de gaiola**	**Motor de indução de anéis**
Projeto	**Rotor não bobinado**	**Rotor bobinado**
Corrente de partida	Alta	Baixa
Conjugado de partida	Baixo	Alto
Corrente de partida/ Corrente nominal	Alta	Baixa
Conjugado máximo	> 160% do conjugado nominal	> 160% do conjugado
Rendimento	Alto	Alto
Equipamento de partida	Simples para partida direta	Relativamente simples
Equipamento de proteção	Simples	Simples
Espaço requerido	Pequeno	Reostato requer um espaço grande
Manutenção	Pequena	Nos anéis
Custo	Baixo	Alto

Tabela 1.10.1 – Comparação entre diferentes tipos de máquinas.

Na seleção correta dos motores, é importante considerar as características técnicas de aplicação e as características de carga, no que se refere a aspetos mecânicos para calcular:

a) Conjugado de partida:

Conjugado requerido para vencer a inércia estática da máquina e produzir movimento. Para que uma carga, partindo da velocidade zero, atinja a sua velocidade nominal é necessário que o conjugado do motor seja sempre superior ao conjugado da carga.

b) Conjugado de aceleração:

Conjugado necessário para acelerar a carga à velocidade nominal. O conjugado do motor deve ser sempre maior que o conjugado de carga, em todos os ponto entre zero e a rotação nominal. No ponto de interseção das duas curvas, o conjugado de aceleração é nulo, ou seja, é atingido o ponto de equilíbrio a partir do qual a velocidade permanece constante. Este ponto de interseção entre as duas curvas deve corresponder a velocidade nominal.

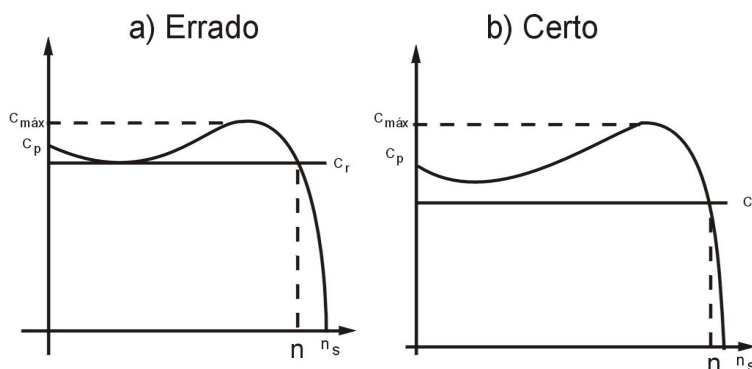



Figura 1.112 – Seleção de motor considerando o conjugado resistente da carga.

Onde: $C_{máx}$ – conjugado máximo;
C_p – conjugado de partida;
C_r – conjugado resistente;
n_S – rotação síncrona;
n – rotação nominal.

O conjugado de aceleração assume valores bastante diferentes na fase de partida. O conjugado médio de aceleração (Ca) obtém-se a partir da diferença entre o conjugado do motor e o conjugado da carga.

c) Conjugado Nominal:

Conjugado nominal necessário para mover a carga em condições de funcionamento à velocidade específica.

O conjugado requerido para o funcionamento normal de uma máquina pode ser constante ou varia entre amplos limites. Para conjugados variáveis, o conjugado máximo deve

ser suficiente para suportar picos momentâneos de carga. As características de funcionamento de uma máquina, quanto ao conjugado, podem dividir-se em três classes:

Conjugado Constante

Nas máquinas deste tipo, o conjugado permanece constante durante a variação da velocidade e a potência aumenta proporcionalmente com a velocidade.

____________ conjugado requerido pela máquina
.... potência requerida pela máquina

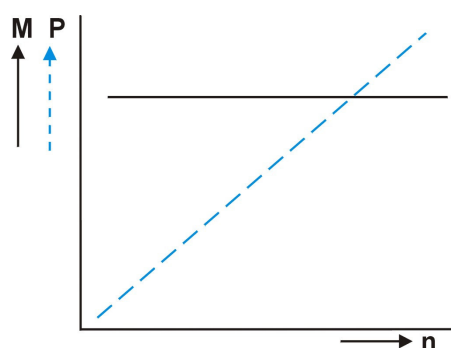



Figura 1.113

Onde: M – conjugado resistente: constante;
P – potência proporcional ao número de rotações (n).

Conjugado Variável

Encontram-se casos de conjugado variável nas bombas, nos ventiladores, em que o conjugado varia com o quadrado da velocidade.

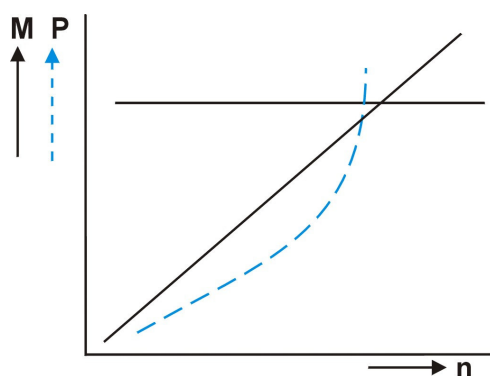



Figura 1.114

Onde: M – conjugado resistente: proporcional ao número de rotações (n);
P – potência proporcional ao número de rotações ao quadrado (n^2).

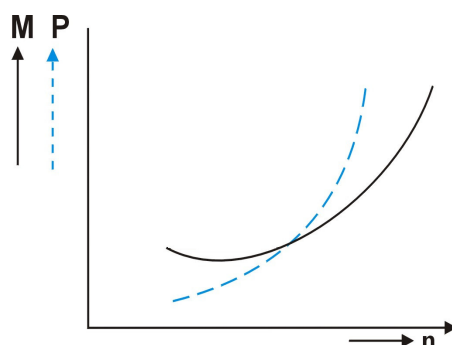



Figura 1.115

Onde: M – conjugado resistente: proporcional ao número de rotações ao quadrado (n^2);
P – potência proporcional ao número de rotações ao cubo (n^3).

Potência Constante

As aplicações de potência constante requerem uma potência igual à nominal para qualquer velocidade.

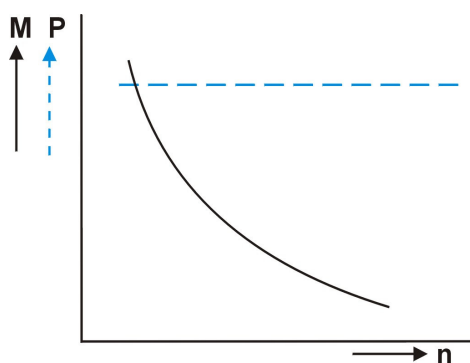



Figura 1.116

Onde: M – conjugado resistente: inversamente proporcional ao número de rotações (n);
P – potência constante.

Para correta especificação do motor, são necessárias as seguintes informações na consulta:

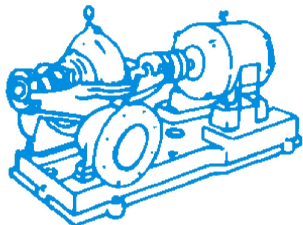
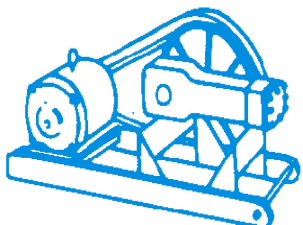
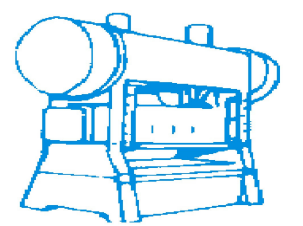
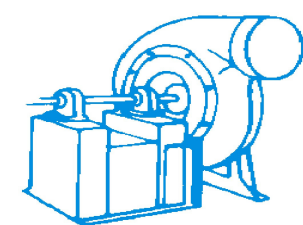
Características da rede de alimentação

a) Tensão de alimentação do motor (e dos aquecedores internos, quando necessários);
b) Freqüência nominal em Hz;
c) Método de partida (quando esta informação não for fornecida, será considerado como partida direta).

Características do ambiente

a) Altitude;
b) Temperatura ambiente;
c) Atmosfera ambiente.

Características construtivas

a) Forma construtiva;
b) Potência em kW, velocidade em rpm;
c) Fator de serviço;
d) Potência térmica;
e) Sentido de rotação (horário ou anti-horário, olhando-se pelo lado do acionamento).

Característica da carga

a) Momento de inércia da máquina acionada e a que rotação está referida;
b) Curva de conjugado resistente;
c) Dados de transmissão;
d) Cargas axiais e seu sentido, quando existentes;
e) Cargas radiais e seu sentido, quando existentes;
f) Regime de funcionamento da carga (número de partidas/hora).

Em resumo, a correta seleção do motor implica que o mesmo satisfaça às exigências requeridas pela aplicação específica. Sob este aspecto o motor deve, basicamente, ser capaz de:

- Acelerar a carga em tempo suficientemente curto para que o aquecimento não venha a danificar as características físicas dos materiais isolantes;
- Funcionar no regime especificado sem que a temperatura de sua diversas partes ultrapasse a classe do isolante, ou que o ambiente possa vir a provocar a destruição do mesmo;
- Sob o ponto de vista econômico, funcionar com valores de rendimento e fator de potência dentro da faixa ótima para a qual foi projetado.

1.10.1 *GUIA DE SELEÇÃO DO TIPO DE MOTOR PARA DIFERENTES CARGAS*

Tipo de carga	Conjugado requerido		Características da carga	Tipo de motor usado
	Partida	**Máximo**		
Bombas centrífugas; ventiladores; furadeiras; compressores; retificadoras; trituradoras.	Entre 1 e 1,5 vezes o conjugado nominal	Valores máximos entre 200% e 250% do nominal	• Condições de partidas fáceis tais como: engrenagens intermediárias, baixa inércia ou uso de acoplamentos especiais, simplificam a partida. • Máquinas centrífugas, tais como bombas onde o conjugado aumenta em função do quadrado da velocidade até um máximo, conseguindo na velocidade nominal. • Na velocidade nominal pode estar sujeita a pequenas sobrecargas	• Conjugado normal • Corrente de partida normal • Categoria N
Bombas alternativas; compressores; carregadores; alimentadores; laminadores de barras.	Entre 2 e 3 vezes o conjugado nominal	Não maior que 2 vezes o conjugado nominal	• Conjugado de partida alto para vencer a elevada inércia, contra pressão, atrito de parada, rigidez nos processos de materiais ou condições mecânicas similares. • Durante a aceleração, o conjugado exigido cai para o valor do conjugado nominal. • É desaconselhável, sujeitar o motor à sobrecargas, durante a velocidade nominal.	• Conjugado de partida alto • Corrente de partida normal • Categoria N
Prensas puncionadoras; guindastes; pontes rolantes; elevadores de talha; tesouras mecânicas; bombas de óleo para poços	3 vezes o conjugado nominal	Requer 2 a 3 vezes o conjugado nominal. São consideradas perdas durante os picos de carga	• Cargas intermitentes, as quais requerem conjugado de partida, alto ou baixo. Requerem partidas freqüentes, paradas e reversões. • Máquinas acionadoras, tais como: prensas puncionadoras, que podem usar volante para suportar os picos de potência. • Pequena regulagem é conveniente para amenizar os picos de potências e reduzir os esforços mecânicos no equipamento acionado. • A alimentação precisa ser protegida dos picos de potências, resultantes das flutuações de carga	• Conjugado de partida alto • Corrente de partida normal • Alto escorregamento • Categoria D
Ventiladores; máquinas-ferramentas; misturadores; transportadores.	Algumas vezes precisa-se somente de parte do conjugado nominal; e outros muitas vezes, o conjugado nominal.	1 ou 2 vezes o conjugado nominal em cada velocidade	• Duas, três ou quatro velocidades fixas são suficientes • Não é necessário o ajuste de velocidade • Conjugado de partida pode ser pequeno (ventiladores) ou alto (transportadores) • As características de funcionamento em várias velocidades, podem variar entre potência constante, conjugado constante ou características de conjugado variável • Máquinas de cortar metal tem potência constante; cargas de atrito são típicas de conjugado constante; ventiladores são de conjugado variável	• Conjugado normal ou alto (velocidades múltiplas)

1.11 ENSAIOS

A finalidade deste capítulo é definir os ensaios que podem ser realizados por solicitação de clientes, com ou sem presença de inspetor.

São agrupados em Ensaios de Rotina, Tipo, Protótipo e Especial, conforme definidos pela norma NBR 7094. Para a realização destes ensaios, deve ser seguida a NBR 5383, que define os procedimentos a serem seguidos para a execução dos ensaios.

A seguir são listados os ensaios de rotina e tipo, protótipo e especial. Outros ensaios não citados, podem ser realizados pelo fabricante, desde que exista um acordo entre as partes interessadas.

1.11.1 *ENSAIOS DE ROTINA*

- Ensaio de resistência elétrica, a frio;
- Ensaio em vazio. Medição da corrente e potência absorvida com tensão nominal;
- Ensaio com rotor bloqueado. Medição da corrente e potência consumida e, conjugado em tensão nominal ou reduzida (caso não seja possível com a nominal);
- Ensaio de tensão secundária para motores com rotor enrolado.
- Ensaio de tensão suportável.

1.11.2 *ENSAIOS DE TIPO*

- Ensaio de resistência elétrica, a frio;
- Ensaio em vazio. Medição da corrente e potência absorvida com tensão nominal;
- Ensaio com rotor bloqueado. Medição da corrente e potência consumida e, conjugado em tensão nominal ou reduzida (caso não seja possível com a nominal);
- Ensaio de tensão secundária para motores com rotor enrolado;
- Ensaio de elevação de temperatura;
- Ensaio da resistência elétrica, a quente;
- Ensaios relativos a potência fornecida. Medição do rendimento, fator de potência, corrente e velocidade com 50%, 75% e 100% da potência nominal;
- Ensaio de conjugado máximo em tensão nominal ou reduzida (caso não seja possível com a nominal);
- Ensaio de tensão suportável.

1.11.3 *ENSAIOS ESPECIAIS*

- Ensaio com rotor bloqueado. Levantamento das curvas características da corrente e potência consumida e, conjugado em função da tensão;
- Ensaio de partida. Levantamento das curvas características de conjugado e corrente em função da velocidade. A tensão deve ser nominal ou reduzida (caso não seja possível com a nominal);
- Ensaio de sobrevelocidade;

- Ensaio de nível de ruído;
- Ensaio de tensão no eixo;
- Ensaio de vibração.

2 ESPECIFICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

2.1 POTÊNCIA NOMINAL

Quando deseja-se escolher um motor para acionar uma determinada carga, é preciso conhecer o conjugado requerido pela carga e a rotação que esta carga deve ter em condições nominais. Conhecendo-se também o tipo de acoplamento é possível saber qual é a rotação nominal do motor.

Portanto a potência nominal do motor é dada por:

$$P_n = 2.\pi.n_N.C_n \qquad (2.1.1)$$

Onde: P_n = Potência nominal do motor em Watt;
C_n = Conjugado nominal do motor em Nm;
n_N = Rotação nominal do motor em rps.

Na equação (2.1.1) considerou-se que o conjugado requerido pela carga é igual ao conjugado nominal do motor. Esta consideração só é verdadeira para acoplamento direto.

Quando o acoplamento for com redução de velocidade, o conjugado requerido pela carga deve ser referido ao eixo do motor, da seguinte maneira:

$$C_n = \frac{1}{\eta_{ac}} \times \frac{n_C}{n_N} \times C_{cn} \qquad (2.1.2)$$

Onde: n_C = Rotação da carga em rps;
C_{cn} = Conjugado de carga nominal, dado em Nm;
η_{ac} = Rendimento do acoplamento;
n_N = Rotação nominal do motor em rps.

O rendimento do acoplamento é definido por:

$$\eta_{ac} = \frac{P_c}{P_n} \qquad (2.1.3)$$

Onde: P_c = Potência transmitida a carga em Watt;
P_n = Potência nominal do motor em Watt.

Na tabela 2.1.1, pode-se observar o rendimento de alguns tipos de acoplamentos mais utilizados.

TIPO DE ACOPLAMENTO	FAIXA DE RENDIMENTO (%)
Direto□Embreagem	100
Eletromagnética□Polia com Correia	87 - 98
Plana□Polia com Correia em	95 - 98
V□Engrenagem□Roda Dentada	97 - 99
(Correia)□Cardã□Acoplamento	96 - 99
Hidráulico	97 - 98
	25 - 100
	100

Tabela 2.1.1 - Rendimento de acoplamentos.

Obs.: Potência normalmente é expressa em kW, que é um múltiplo do Watt.

Portanto : 1 kW = 1000 W.

Uma outra unidade de potência muito utilizada na prática é o Cavalo Vapor (cv). A relação entre cv e kW é mostrado abaixo:

1 cv = 0,736 kW

Exemplo: Qual a potência que um motor de IV pólos 60 Hz deve ter para acionar uma carga com conjugado de 4 Nm, rotação de 1200 rpm e acoplamento por correia dentada ?

$$P_n = 2.\pi.n_N.C_n$$

$$C_n = \frac{1}{\eta_{ac}} \times \frac{n_C}{n_N} \times C_{cn}$$

$1rps = \frac{1rpm}{60}$; $C_{cn} = 4Nm$; $n_C = 1200rpm$; $n_N = 1800rpm$; $\eta_{ac} = 97 - 98\%$

$$C_n = \frac{1}{0{,}97} \times \frac{1200}{1800} \times 4$$ $C_n = 2{,}75$ Nm

$$P_n = 2\pi \times \frac{1800}{60} \times 2{,}75$$ $P_n = 518{,}36$ W = 0,518 kW ou 0,70 cv

2.2 CONJUGADO RESISTENTE DA CARGA

É o conjugado requerido pela carga, e portanto, depende do tipo de carga a ser acionada pelo motor. Porém todos podem ser representados pela expressão:

$$C_c = C_O + k_c . n^x \qquad (2.2.1)$$

Onde : C_c = Conjugado resistente da carga em Nm;
C_0 = Conjugado da carga para rotação zero em Nm;
k_c = Constante que depende da carga;
x = Parâmetro dependente da carga, pode assumir os valores -1, 0, 1, 2.

De acordo com a equação (2.2.1) percebe-se que o conjugado da carga varia com a rotação n. Esta variação depende do parâmetro x, e assim as cargas podem ser classificadas em quatro grupos:

2.2.1 *CONJUGADO CONSTANTE*

Para este tipo de carga o parâmetro x é zero (x = 0). Portanto:

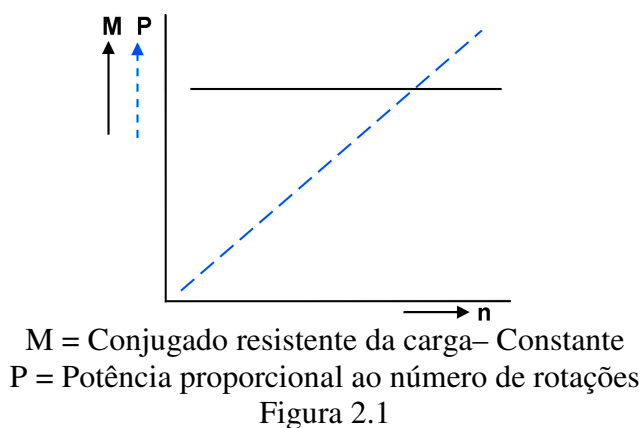
$$C_c = (C_0 + k_c) = \text{Constante} \qquad (2.2.1.1)$$

Nas máquinas deste tipo, o conjugado permanece constante durante a variação de velocidade e a potência aumenta proporcionalmente com a velocidade. Logo:

$$P_c = (C_0 + k_c) \times n \qquad (2.2.1.2)$$

Onde : k_c = Constante que depende da carga;
P_c = Potência de carga.

Este caso é mostrado na figura 2.1.

M = Conjugado resistente da carga– Constante
P = Potência proporcional ao número de rotações
Figura 2.1

Exemplos de cargas com conjugados constantes:

- Compressores a pistão;
- Talhas;
- Guindastes;
- Bombas a pistão;
- Britadores;
- Transportadores contínuos.

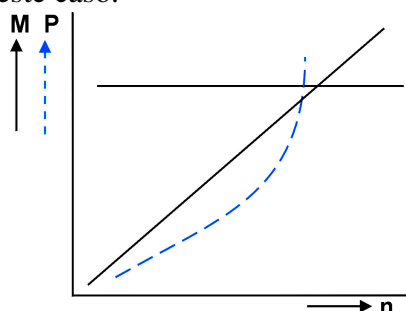
2.2.2 *CONJUGADO LINEAR*

Neste grupo o parâmetro x é igual a 1 (x = 1). Então:

$$C_c = C_0 + (k_c \times n) = \text{Linear} \qquad (2.2.2.1)$$

Nestes tipos de máquinas o conjugado varia linearmente com a rotação; já a potência, varia com o quadrado da rotação. Portanto:

$$P_c = (C_0 \times n) + (k_c \times n^2) \qquad (2.2.2.2)$$

A figura 2.2 mostra este caso.

M = Conjugado resistente de carga proporcional a n
P = Potência proporcional a n^2
Figura 2.2

Exemplos de cargas com conjugado linear:

- Calandra com atrito viscoso (para calandrar papel).

Obs.: Aplicação muito rara.

2.2.3 *CONJUGADO QUADRÁTICO*

Neste caso tem-se x = 2 e o conjugado é dado por:

$$C_c = C_0 + (k_c \times n^2) = \text{Parabólico} \qquad (2.2.3.1)$$

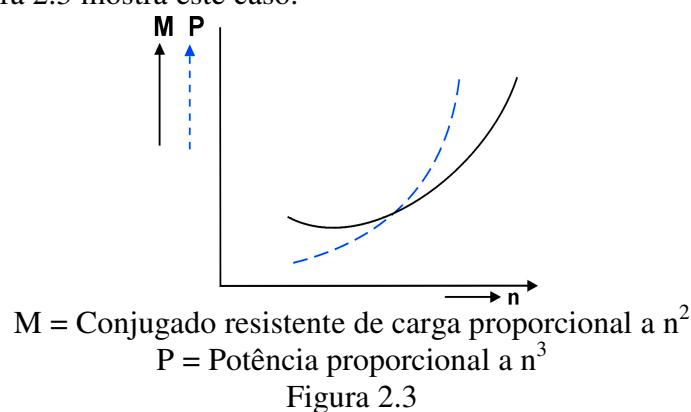
Neste caso o conjugado varia com o quadrado da rotação e a potência com o cubo da rotação. Logo:

$$P_c = (C_0 \times n) + (k_c \times n^3) \qquad (2.2.3.2)$$

A figura 2.3 mostra este caso.

M = Conjugado resistente de carga proporcional a n^2

P = Potência proporcional a n^3

Figura 2.3

Exemplos de cargas com conjugado quadrático:

- Bombas centrífugas;
- Ventiladores;
- Misturadores centrífugos.

2.2.4 *CONJUGADO HIPERBÓLICO*

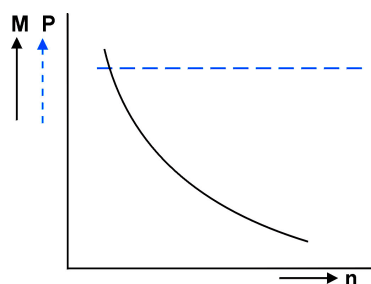
Neste caso temos x = – 1, e o conjugado é dado por:

$$C_c = \frac{k_c}{n} = \text{Hiperbólico} \qquad (2.2.4.1)$$

Neste tipo de carga a constante C_0 pode ser considerado nulo. Pela expressão (2.2.4.1) percebe-se que para n = 0, o conjugado seria infinito, o que não tem sentido físico. Este fato na prática não acontece porque a rotação da máquina só pode variar entre um limite mínimo (n_1) e máximo (n_2).

A potência neste caso permanece constante, isto é, não varia com a rotação, ou seja:

$$P_c = k_c = \text{Constante} \qquad (2.2.4.2)$$

A figura 2.4 mostra este caso.

M = Conjugado resistente de carga proporcional a n^{-1}
P = Potência de carga constante
Figura 2.4

Exemplos de cargas com conjugado hiperbólico:

- Bobinadeira de papel (normalmente usa-se motor CC);
- Bobinadeira de pano (normalmente usa-se motor CC);
- Descascador de toras;
- Tornos (análise feita com conjugado constante com elevado número de manobras, em geral motores de dupla velocidade);
- Bobinadeira de fios.

2.2.5 *CONJUGADOS NÃO DEFINIDOS*

Neste caso não se aplica a equação (2.2.1), pois não pode-se determinar sua equação de maneira precisa, logo tem-se que determinar o seu conjugado utilizando técnicas de integração gráfica. Na prática, analisa-se como conjugado constante, pelo máximo valor de torque absorvido.

A figura 2.5 mostra este tipo:

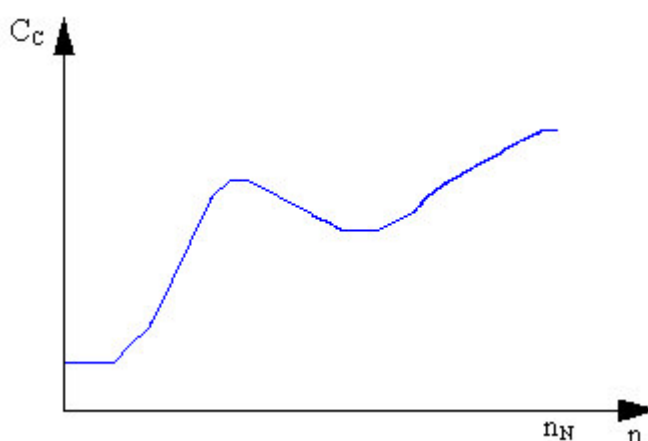



Figura 2.5

2.3 CONJUGADO RESISTENTE MÉDIO DA CARGA

Conhecendo-se a curva do conjugado da carga é possível determinar o conjugado médio. O conhecimento do conjugado médio é importante no cálculo do tempo de aceleração.

Na figura 2.6 está mostrado uma curva de conjugado e o conjugado médio da carga.

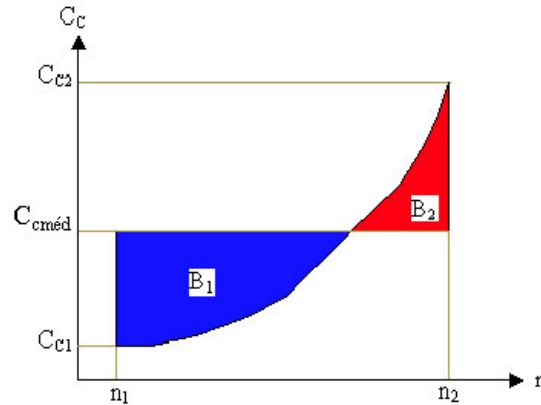



Figura 2.6 – Curva de Conjugados de Cargas

O conjugado médio da carga pode ser obtido graficamente, bastando que se observe que a área B_1 seja igual a área B_2.

Analiticamente o conjugado médio da carga pode ser calculado como segue:

O conjugado da carga é dado pela expressão (2.2.1), ou seja:

$$C_c = C_0 + (k_c \times n^x) \qquad (2.3.1)$$

Para x = 0, 1, 2 o conjugado médio pode ser calculado como:

$$C_{cméd} = \frac{1}{n._2 - n._1} \int_{n2}^{n1} C_c .dn$$

$$C_{cméd} = \frac{1}{n._2 - n._1} \int_{n2}^{n1} (C_0 + k_c \times n^x).dn$$

$$C_{cméd} = \frac{1}{n._2 - n._1} \left((C_0 \times n) + \left(\frac{1}{x+1} \times k_c \times n^{x+1} \right)_{n_2}^{n_1} \right)$$

$$C_{cméd} = C_0 + \left(k_c \times \left(\frac{n_2^{x+1} - n_1^{x+1}}{n_2 - n_1} \right) \times \frac{1}{x+1} \right) \qquad (2.3.2)$$

Quando a carga parte do <u>REPOUSO</u>, tem-se $n_1 = 0$, logo:

$$C_{cméd} = C_0 + \left(k_c \times \frac{n_2^x}{x+1} \right) \qquad (2.3.3)$$

Portanto, tem-se:

1) Para cargas de conjugado constante (x = 0);

$$C_{cméd} = C_0 + k_c = \text{Constante} \qquad (2.3.4)$$

2) Para cargas de conjugado linear (x = 1);

$$C_{cméd} = C_0 + \left(\frac{1}{2} \times k_c \times n_2 \right) \qquad (2.3.5)$$

3) Para cargas de conjugado quadrático (x = 2);

$$C_{cméd} = C_0 + \left(\frac{1}{3} \times k_c \times n_2^2 \right) \qquad (2.3.6)$$

4) Para cargas de conjugado hiperbólico (x = -1);

Neste caso o conjugado é dado pela expressão (2.3.8), ou seja:

$$C_c = \frac{k_c}{n} \qquad (2.3.7)$$

Supondo que a rotação da carga varia entre n_1 e n_2, figura 2.7, o conjugado médio de carga é dado por:

$$C_{cméd} = \frac{1}{n_2 - n_1} \int_{n1}^{n2} \frac{k_c}{n} .dn$$

$$C_{cméd} = \frac{k_c}{n_2 - n_1} \times \ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \qquad (2.3.8)$$

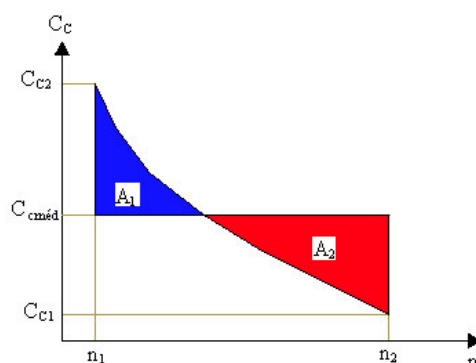



Figura 2.7 – Conjugado resistente médio para x = -1

2.4 MOMENTO DE INÉRCIA DA CARGA

O momento de inércia da carga acionada é uma das características fundamentais para o estudo da aplicação do motor elétrico. Tanto o momento do motor como da carga afetam o tempo de aceleração do motor. O momento de inércia é a grandeza que mede a "resistência" que um corpo oferece à uma mudança em seu movimento de rotação em torno de um dado eixo. Depende do eixo de rotação, da forma do corpo e da maneira como sua massa é distribuida.

A unidade do momento de inércia no sistema SI é o kgm^2.

O momento de inércia de uma máquina, que tem rotação diferente da do motor (figura 2.8), deverá ser referido ao eixo do motor conforme expressão:

$$J_{ce} = J_c \times \left(\frac{n_C}{n_N} \right)^2 \qquad (2.4.1)$$

Onde: J_{ce} = Momento de inércia da carga referida ao eixo do motor em kgm^2;
J_c = Momento de inércia da carga em kgm^2.

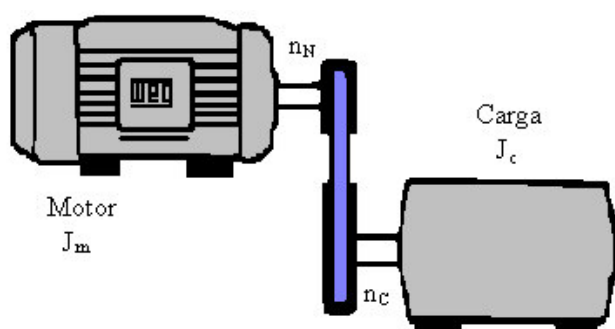



Figura 2.8 – Momento de inércia em rotações diferentes

A inércia total vista pelo motor será:

$$J_t = J_m + J_{ce} \qquad (2.4.2)$$

Obs.: Uma grandeza muito usada para medir o momento de inércia é o "Momento de Impulsão", conhecido como GD^2 da carga, expresso em kgm^2. Sua relação com o momento de inércia é dado por:

$$J = \frac{GD^2}{4} \qquad (2.4.3)$$

2.5 CONJUGADO X VELOCIDADE DO MOTOR

O motor de indução tem conjugado igual a zero à velocidade síncrona. À medida que a carga vai aumentando, a rotação do motor vai caindo gradativamente, até um ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver. Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o rotor.

Representando num gráfico a variação do conjugado com a velocidade para um motor, obtêm-se uma curva com o aspecto representado na figura 2.9.

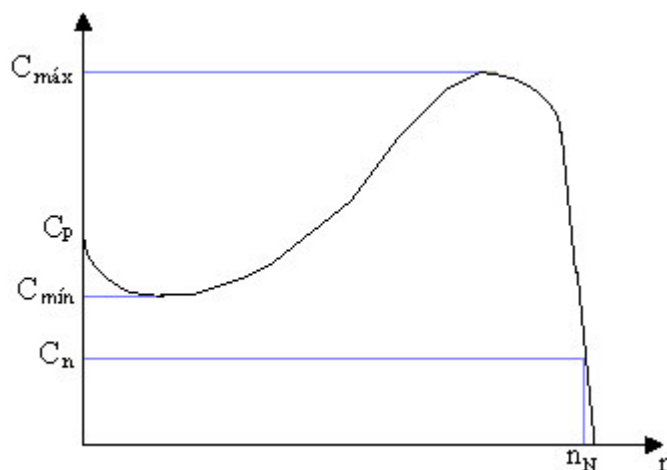



Figura 2.9 – Curva Conjugado x Velocidade

Nesta curva vamos destacar e definir alguns pontos importantes. Os valores dos conjugados relativos a estes pontos são especificados por norma (NBR 7094) e serão apresentados a seguir:

2.5.1 *CONJUGADO BÁSICO*

É o conjugado calculado em função da potência e velocidade síncrona.

$$C_b = \frac{P_n}{2.\pi.n_S}$$

Onde: C_b = Conjugado base em Nm;
n_S = Rotação síncrona em rps;
P_n = Potência nominal em W.

2.5.2 *CONJUGADO NOMINAL OU DE PLENA CARGA*

É o conjugado desenvolvido pelo motor à potência nominal, sob tensão e frequência nominais.

$$C_n = \frac{P_n}{2.\pi.n_N}$$

Onde: C_n = Conjugado Nominal em Nm;
n_N = Rotação nominal em rps;
P_n = Potência nominal em W.

2.5.3 *CONJUGADO COM ROTOR BLOQUEADO*

Também denominado "Conjugado de Partida" ou "Conjugado de Arranque". É o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor com rotor bloqueado. O valor do conjugado de partida depende do projeto do motor e normalmente é encontrado no catálogo ou na folha de dados do motor.

O conjugado de partida pode ser expresso em Nm ou mais comumente em porcentagem do conjugado nominal, ou seja:

$$C_P(\%) = \frac{C_P(Nm)}{C_n(Nm)} \times 100$$

Obs.: Na prática, o conjugado de rotor bloqueado deve ser o mais alto possível para que o motor possa vencer a inércia inicial da carga e possa acelera-la rapidamente, principalmente quando a partida é com tensão reduzida.

2.5.4 *CONJUGADO MÍNIMO*

É o menor conjugado desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo.

Na prática, este valor não deve ser muito baixo, isto é, a curva não deve apresentar uma depressão acentuada na aceleração, para que a partida não seja muito demorada, sobreaquecendo o motor, especialmente nos casos de alta inércia ou partida com tensão reduzida.

O conjugado mínimo também pode ser expresso em Nm ou em porcentagem do conjugado nominal.

2.5.5 *CONJUGADO MÁXIMO*

É o maior conjugado desenvolvido pelo motor, sob tensão e freqüência nominais, sem queda brusca de velocidade.

Na prática, o conjugado máximo deve ser o mais alto possível, por duas razões principais:

a) motor deve ser capaz de vencer eventuais picos de carga, como pode acontecer em certas aplicações, como por exemplo: britadores, misturadores, calandras e outras.
b) motor não deve “arriar”, isto é, perder bruscamente a velocidade quando ocorrem quedas de tensão excessivas momentaneamente.

O conjugado máximo normalmente é expresso em porcentagem do conjugado nominal.

$$C_{máx(\%)} = \frac{C_{máx}(Nm)}{C_n(Nm)}$$

2.5.6 *FATORES DE CORREÇÃO DOS CONJUGADOS EM FUNÇÃO DA TENSÃO*

Quando a tensão aplicada ao motor for diferente da nominal, os conjugados e a corrente de partida deverão ser corrigidos. A correção deve ser feita através de fatores de multiplicação k_1, para a corrente de partida, e k_2 para os conjugados C_P e $C_{máx}$, tiradas da figura 2.10.

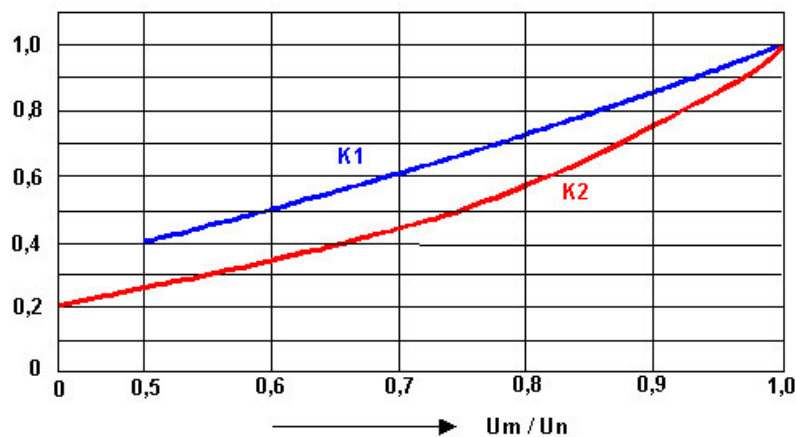



Figura 2.10 – Fatores de redução k_1 e k_2

Portanto:

$$\left(\frac{I_p}{I_n}\right)_U = k_1 \times \left(\frac{I_p}{I_n}\right)_{U_n}$$

$$\left(\frac{C_P}{C_n}\right)_U = k_2 \times \left(\frac{C_P}{C_n}\right)_{U_n}$$

$$\left(\frac{C_{máx}}{C_n}\right)_U = k_2 \times \left(\frac{C_{máx}}{C_n}\right)_{U_n}$$

2.6 CONJUGADO MOTOR MÉDIO

O conjugado mecânico no eixo do motor é dado pela expressão abaixo:

$$C_M = \frac{3.R_2.I_2^2}{2.\pi.n_S.S} \qquad (2.6.1)$$

Onde: R_2 = Resistência de fase do rotor em Ohm;
I_2 = Corrente de fase do rotor em A;
S = Escorregamento do motor em p.u;
n_S = Rotação síncrona.

A equação (2.6.1) representa a curva de conjugado do motor, que após algumas simplificações pode ser representado pela expressão:

$$C_M = \frac{A-(B\times n)}{(C\times n^2)-(D\times n)+E} \qquad (2.6.2)$$

Onde: C_M = Conjugado motor em Nm.
n = Rotação do motor em rps.
A,B,C,D,E = Constantes positivas que dependem do projeto do motor.

O valor das constantes dependem do estado de saturação magnética do núcleo do motor.

Representando a equação (2.6.2) em um gráfico, obtem-se a curva característica do conjugado do motor, figura 2.11:

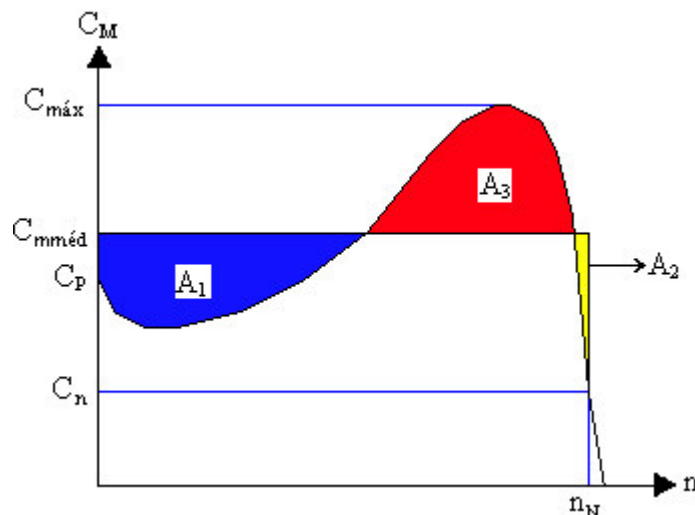



Figura 2.11 – Conjugado motor médio

Analiticamente o conjugado motor médio pode ser calculado pela integral:

$$C_{mméd} = \frac{1}{n_2 - n_1}\int_{n_2}^{n_1}\left(\frac{A-(B\times n)}{(C\times n^2)-(D\times n)+E}\right) \qquad (2.6.3)$$

Como esta integral é muito difícil de ser resolvida, na prática é feita a integração gráfica. Isto não é muito complicado, basta que se observe que a soma das áreas A_1 e A_2 seja igual a área A_3 (ver figura 2.11).

Usualmente tem-se:

a) Para motores categorias N e H:

$$C_{mméd} = 0{,}45 \times \left(\frac{C_P}{C_n} + \frac{C_{máx}}{C_n} \right) \times C_n \qquad (2.6.4)$$

b) Para motores categoria D:

$$C_{mméd} = 0{,}60 \times \frac{C_P}{C_n} \times C_n \qquad (2.6.5)$$

Quando o conjugado nominal (C_n) é dado em kgfm, basta multiplicar por 9,81 para obtermos em Nm.

2.7 TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO (T_{RB})

Tempo de rotor bloqueado é o tempo necessário para que o enrolamento da máquina, quando percorrido pela sua corrente de partida (“arranque”), atinja a sua temperatura limite, partindo da temperatura atingida em condições nominais de serviço e considerando a temperatura ambiente no seu valor máximo.

Este tempo é um parâmetro que depende do projeto da máquina. Encontra-se normalmente no catálogo ou na folha de dados do fabricante.

A tabela (2.7.1) mostra os valores limites da temperatura de rotor bloqueado, de acordo com as normas NEMA e IEC.

CLASSE TÉRMICA	T_{MAX}		ΔT_{MAX} □
	NEMA MG1.12.53	IEC 79.7	
B□F□H	175□200□225	185□210□235	80□100□125

Tabela (2.7.1) – Temperatura limite de rotor bloqueado.

Para partidas com tensão reduzida o tempo de rotor bloqueado pode ser corrigido como segue:

$$t_{rb} = t_b \times \left(\frac{U_n}{U_r} \right)^2 \qquad (2.7.1)$$

Onde: t_{rb} = Tempo de rotor bloqueado com tensão reduzida;
t_b = Tempo de rotor bloqueado à tensão nominal;
U_n = Tensão nominal;
U_r = Tensão reduzida.

2.7.1 *TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO EM RELAÇÃO A CLASSE ISOLANTE*

Os tempos de rotor bloqueado apresentados em catálogos estão referenciados ao isolante classe “B”. Ao trocar-se o isolante para uma classe superior, pode-se aumentar o tempo de rotor bloqueado (t_{rb}), da seguinte maneira:

$$t_{rb} = \frac{T_{MÁX} - T_{AMB} - \Delta T_{MOTOR}}{k}$$

Onde: k = $5{,}52 \times 10^{-4} . [(I_p/I_n).J_1]^2$
$T_{MÁX}$ = Temperatura máxima da classe para curta duração (picos de temperatura).
T_{MOTOR} = Elevação de temperatura do motor.

(I_p/I_n)	= Relação da corrente de partida.
J_1	= Densidade de corrente do motor.
T_{AMB}	= Temperatura ambiente.

A tabela (2.7.1) apresenta os valores limites para $T_{MÁX}$ e $\Delta T_{MÁX}$, para cada classe de isolante utilizada.

Pode-se notar que o tempo de rotor bloqueado é inversamente proporcional a $(I_p/I_n)^2$ ou J_1^2. Exemplos:

Classe "F" em relação a classe "B":

$$\frac{t_{rb(F)}}{t_{rb(B)}} = \frac{\frac{210-40-80}{k}}{\frac{185-40-80}{k}} = \frac{90}{65} = 1{,}3846$$

Portanto: $t_{rb(F)} = 1{,}3846.t_{rb(B)}$

Classe "H" em relação a classe "B":

$$\frac{t_{rb(H)}}{t_{rb(B)}} = \frac{\frac{235-40-80}{k}}{\frac{185-40-80}{k}} = \frac{115}{65} = 1{,}7692$$

Portanto: $t_{rb(H)} = 1{,}7692.t_{rb(B)}$

Classe "H" em relação a classe "F":

$$\frac{t_{rb(H)}}{t_{rb(B)}} = \frac{\frac{235-40-80}{k}}{\frac{210-40-80}{k}} = \frac{115}{90} = 1{,}2778$$

Portanto: $t_{rb(H)} = 1{,}2778.t_{rb(F)}$

2.7.2 *TEMPO DE ACELERAÇÃO*

Tempo de aceleração é o tempo que o motor leva para acionar a carga desde a rotação zero até a rotação nominal.

O tempo de aceleração permite verificar se o motor consegue acionar a carga dentro das condições exigidas pela estabilidade térmica do material isolante. O tempo de aceleração também é um parâmetro útil para dimensionar o equipamento de partida e o sistema de proteção.

O ideal seria que o tempo de aceleração fosse bem menor que o tempo de rotor bloqueado. Quando não pode ser muito menor, pelo menos deve obedecer a relação abaixo:

$$t_a < t_{rb} \times 0.8 \qquad (2.7.2.1)$$

Onde: t_{rb} = tempo máximo de rotor bloqueado.

Para um movimento de rotação é válida a relação:

$$CA = J\frac{dw}{dt} \qquad (2.7.2.2)$$

Onde: J = momento de inércia do corpo em kgm^2;
C = conjugado acelerador em Nm;
w = velocidade angular em rad/s.

A velocidade angular pode ser calculada por:

$$w = 2.\pi.n \qquad (2.7.2.3)$$

Para o caso em que o motor deve acionar uma carga, tem-se:

$$J = J_t = J_m + J_{ce} \qquad (2.7.2.4)$$

Onde: J_t = inércia total referida ao eixo do motor (2.4.2).

O conjugado acelerador pode ser substituído sem perda de precisão pelo conjugado acelerador médio dado por:

$$C_{AMÉD} = C_{mméd} - C_{rméd} \qquad (2.7.2.5)$$

Onde: $C_{rméd} = R \times C_{cméd}$

O gráfico da figura 2.12, mostra o conjugado acelerador médio.

Figura 2.12 – Conjugado acelerador médio

Substituindo (2.7.2.3), (2.7.2.4) e (2.7.2.5) em (2.7.2.2), tem-se:

$$C_{mméd} - C_{rméd} = (J_m - J_{ce}) \times 2.\pi \times \frac{dn}{dt} \qquad (2.7.2.6)$$

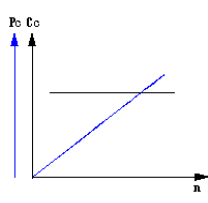
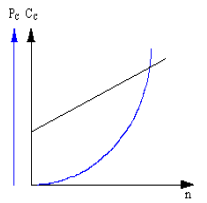
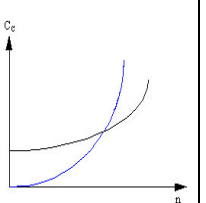
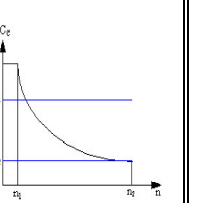
Portanto:

$$dt = 2.\pi.\frac{J_m + J_{ce}}{C_{mméd} - C_{rméd}} \times dn \qquad (2.7.2.7)$$

Integrando, tem-se:

$$\int_0^{t_a} dt = 2.\pi.\frac{J_m + J_{ce}}{C_{mméd} - C_{rméd}} \int_0^n dn$$

$$t_a = 2.\pi.n \times \left(\frac{J_m + J_{ce}}{C_{mméd} - C_{rméd}} \right) \qquad (2.7.2.8)$$

2.7.3 *POTÊNCIA DINÂMICA OU DE ACELERAÇÃO*

O tempo de aceleração sempre deve ser menor que o tempo de rotor bloqueado do motor.

A potência dinâmica é a potência necessária para acelerar a carga até a rotação nominal em um intervalo de tempo menor que o tempo de rotor bloqueado.

Esta potência, na medida do possível, deve ser igual à potência nominal do motor. Porém dependendo das características da carga (inércia e conjugado), a potência dinâmica pode assumir valores bem maiores que a potência nominal.

Nestes casos deverá ser feito um estudo TÉCNICO-ECONÔMICO, para ver se é possível utilizar um acoplamento especial tal como hidráulico, eletromagnético ou de fricção (embreagem). Dependendo do estudo técnico-econômico pode tornar-se evidente que a melhor solução seria um outro tipo de motor, por exemplo um motor de anéis ou motor de gaiola acionado por conversor de frequência.

TABELA 2.7.3.1 – TEMPO DE ACELERAÇÃO – MOTOR DE INDUÇÃO				
Conj. Resistente de carga	Constante	Linear	Parabólico	Hiperbólico
Curva: Conjugado X Rotação				
Exemplos de Aplicação	• Compressores à pistão • Talhas • Bombas à pistão • Britadores • Transportadores contínuos • Extrusoreas	• Calandras • Bombas de vácuo	• Bombas centrífugas • Ventiladores, Misturadores centrífugos • Compressor centrífugo	• Bobinadeira de fios, panos e papel • Descascador de toras • Tornos
Categoria do motor acionador	N H	N H	N	Corrente Contínua
Conjugado de Carga médio ($C_{cméd}$)	C_{cn}	$\frac{C_0 + C_{cn}}{2}$	$\frac{2C_0 + C_{cn}}{3}$	$\frac{C_{cn} \times n_N}{n_N - n_1} . \ln\left(\frac{n_N}{n_1}\right)$
Momento de inércia da carga referida ao motor	$J_{ce} = J_c \times \left(\frac{n_C}{n_N}\right)^2$			
Relação de transmissão	$R = \frac{n_C}{n_N}$			
Conjugado resistente médio	$C_{rméd} = R \times C_{cméd}$			
Conjugado motor médio — N/H	$C_{mméd} = 0{,}45 \times \left(\frac{C_P}{C_n} + \frac{C_{máx}}{C_n}\right) \times C_n \quad (\times 9{,}81)$			
Conjugado motor médio — D	$C_{mméd} = 0{,}60 \times \left(\frac{C_P}{C_n}\right) \times C_n \quad (\times 9{,}81)$			
Tempo de aceleração	$t_a = 2.\pi.n_N \times \left(\frac{J_m + J_{ce}}{C_{mméd} - C_{rméd}}\right)$			
Unidades	J = momento de inércia (kgm²) C = Conjugado (Nm)	n = rotação (rps) t = tempo (s)		
Quando deseja-se mudar de classe de isolamento	De "B" para "F"	$t_{rb(F)} = 1{,}3846.t_{rb(B)}$		
	De "F" para "H"	$t_{rb(H)} = 1{,}2778.t_{rb(F)}$		
	De "B" para "H"	$t_{rb(H)} = 1{,}7692.t_{rb(B)}$		

3 VARIAÇÃO DE VELOCIDADE

3.1 INTRODUÇÃO

Os motores elétricos constituem parte dos equipamentos mais amplamente utilizados na indústria e, no Brasil, a fabricação de motores é um segmento importantíssimo da atividade econômica. Considerando-se um rendimento médio da ordem de 85% no universo de motores elétricos em aplicações industriais, cerca de 15% da energia elétrica industrial será transformada em perdas nos motores. Portanto, o acionamento de máquinas e equipamentos mecânicos por motores elétricos é um assunto de extraordinária importância econômica. Os fundamentos técnicos e econômicos para a aplicação de acionamentos de controle de velocidade de motores elétricos trifásicos, foram ampliados consideravelmente pelos avanços feitos no desenvolvimento de componentes eletrônicos e de potência. O acionamento elétrico é um sistema capaz de converter energia elétrica em mecânica, produzindo trabalho e mantendo controle sobre tal processo de conversão. Um sistema de acionamento compreende o motor elétrico e seu equipamento de comando e/ou controle, os meios de transmissão (mecânicos) de energia do motor à máquina acionada para que esta realize a função desejada. Atualmente existem disponíveis vários tipos de conversores para acionamento e controle de velocidade de motores, cada um adaptado aos diferentes tipos de motores. Embora os acionamentos CA estejam sendo mais largamente utilizados, muitos sistemas podem ser acionados com motores CC, sob controle de um conversor realimentado para melhor operação, ou então utilizar conversores de freqüência com controle vetorial. Uma consideração importante é o fato de que em um motor CC o torque e a velocidade podem ser ajustados independentemente pela corrente e pelo fluxo de magnetização, e em motores CA, atualmente com o avanço das tecnologias de acionamento por conversores de freqüência com controle vetorial, o torque e o fluxo de magnetização são controlados pela decomposição da corrente estatórica, conseguindo-se desta forma obter as mesmas características do acionamento por motor CC. Esta apostila tem como objetivo ampliar os conhecimentos de pessoas envolvidas nas áreas de aplicações, projetos e afins, familiarizando-as com técnicas e recursos existentes, visando fornecer as informações necessárias à correta seleção e aplicação de acionamentos com velocidade variável de motores de indução trifásicos, segundo as suas necessidades.

3.2 SISTEMA DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE

Uma das necessidades que sempre existiram, no passado, foi a variação de velocidade em motores de indução, pois a mesma é fixa e está relacionada com a característica elétrica construtiva do motor e a freqüência da rede a qual ele está ligado.

Existem atualmente vários sistemas de variação de velocidade e que para melhor entendimento iremos classificá-los em:

- Variadores mecânicos;
- Variadores hidráulicos;
- Variadores eletromagnéticos;
- Variadores eletroeletrônicos.

3.2.1 *VARIADORES MECÂNICOS*

Os primeiros sistemas que foram utilizados para se obter uma velocidade diferente das velocidades que eram possíveis utilizando motores de indução foram os sistemas mecânicos, pois são os de maior simplicidade de construção, envolvendo um baixo custo, e que atendem até hoje a alguns processos onde não são necessárias variações de velocidade, ou que possuem uma variação pequena condicionada a certos limites (mecânicos e elétricos) do equipamento responsável pela variação de velocidade.

Com o aumento da necessidade de variação de velocidade em vários processos mais complexos que exigem uma larga faixa de variação, precisão na velocidade ajustada, características de partida e parada do processo controladas, e outras características, foram sendo desenvolvidos vários métodos, os quais relacionaremos adiante.

3.2.1.1 *POLIAS FIXAS*

Este método permite variação discreta de velocidade. Este sistema de acoplamento é utilizado onde há necessidade de uma redução ou ampliação de velocidade, porém sempre fixas, sem a possibilidade de uma variação contínua de rotação. Uma vez definida uma rotação de operação e havendo a necessidade de uma nova rotação logo após, a máquina deve ser desligada para que seja possível realizar a troca das polias com uma nova relação de redução e assim conseguir a nova rotação desejada. O inconveniente em primeira análise deste método seria operacional, pois a troca constante de polias dificultaria o andamento do processo e além disso, este tipo de equipamento geralmente oferece um baixo rendimento com o motor quase sempre operando nas suas condições nominais, independente das rotações desejadas na sua saída.

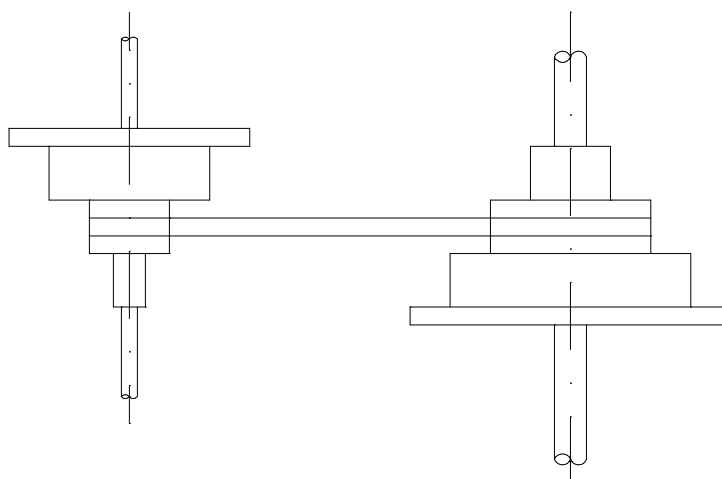



Figura 3.1 – Sistema de variação por polias fixas de vários estágios

3.2.1.2 *POLIAS CÔNICAS*

Este método permite variação contínua de velocidade. Neste sistema de acoplamento por polias permite-se que seja feita a variação de velocidade da máquina através de duas polias cônicas contrapostas conforme demonstrado no desenho a seguir:

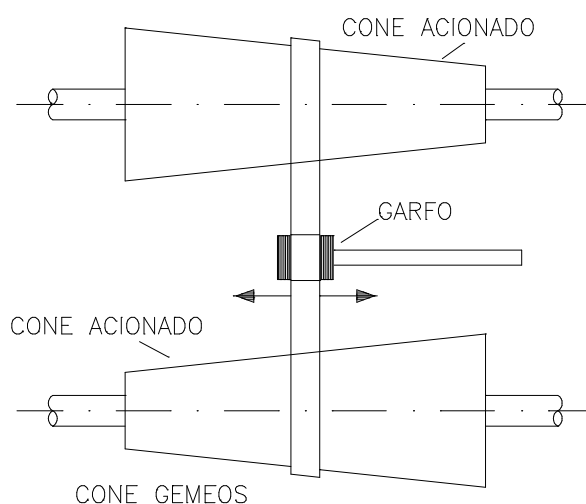



Figura 2.2 - Sistema de variação por polias cônicas

Através do posicionamento da correia sobre a superfície das polias cônicas, é possível variar a velocidade da máquina, pois será alterado o diâmetro relativo das polias, e consequentemente a sua relação de redução. Este sistema é utilizado onde não é necessária uma faixa de variação de velocidade muito ampla, e que não requer também variações rápidas e precisas. É mais comumente utilizado para pequenos ajustes de sincronismo mecânico, de baixa precisão, entre acionamentos de vários pontos de uma mesma máquina.

3.2.1.3 *POLIAS VARIADORAS*

Este método permite variação contínua de velocidade. Este sistema de acoplamento por polias é diferenciado, pois utiliza um dispositivo mecânico que consiste de duas flanges cônicas (que formam uma polia) que podem se movimentar sobre o eixo acionado, conforme mostra o desenho a seguir:

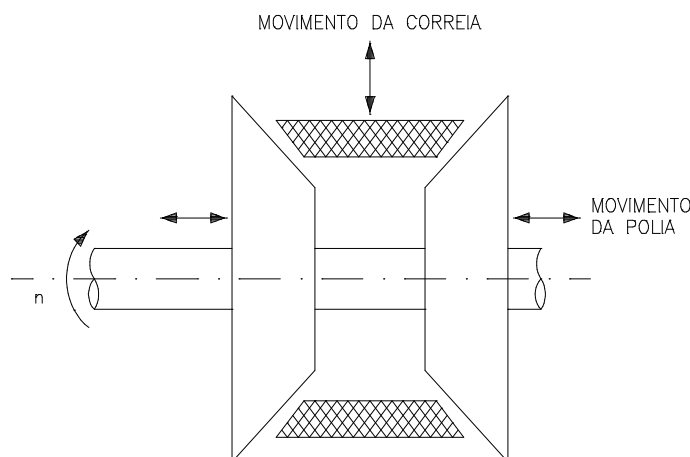



Figura 3.3 - sistema de variação por polias variadoras

Percebe-se então que com o movimento de aproximação entre as duas flanges, a correia é forçada a subir e a se distanciar do eixo acionado, ou vice-versa, mudando com isso o diâmetro relativo da polia e consequentemente a velocidade da máquina.

Este sistema também é utilizado nas mesmas situações em que são utilizadas as polias cônicas, sendo que há o inconveniente de ser um equipamento de excessiva manutenção devido ao desgaste da correia.

3.2.1.4 *MOTO-REDUTORES*

Este método permite variação discreta ou contínua de velocidade, em função do tipo de moto-redutor utilizado. Este sistema de acoplamento foi um avanço em relação aos anteriores, pois neste sistema já se consegue variar a rotação de saída através de um jogo de polias/engrenagens variáveis, embora devam ser considerados alguns limites descritos a seguir. Com o motor ligado diretamente à rede elétrica, independente da rotação desejada na saída, o motor sempre estará girando na sua rotação e freqüência nominal, e ainda o que é mais crítico, sempre consumindo potência nominal, havendo portanto desperdício de energia elétrica. Não permitem controle remoto (comando à distância), exceto em casos com servoacionamentos. Para se fazer a variação de rotação, somente com um comando local (no equipamento) é que se consegue alterar a relação de reduções e consequentemente a rotação de saída do equipamento (mecanicamente). O rendimento do conjunto por sua vez é muito baixo, o que também desperdiça energia elétrica. São equipamentos limitados a baixas e médias potências, pois as engrenagens não suportam potências elevadas.

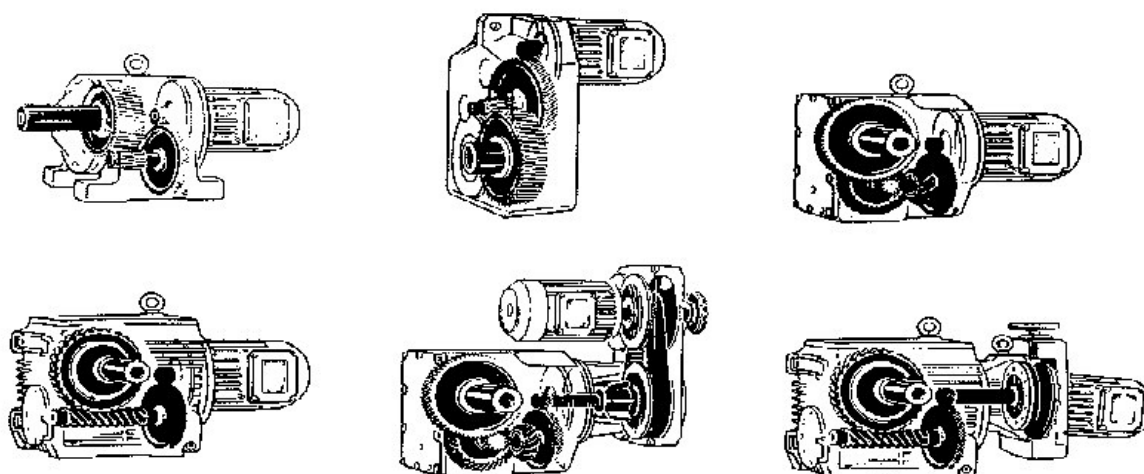



Figura 3.4 - Sistema de variação por moto-redutores

3.2.1.5 *VARIADORES P.I.V*

Este método permite variação contínua de velocidade. Os P.I.V`s são dispositivos mecânicos de grande aplicação no controle de velocidade, principalmente em máquinas têxteis. São mecanismos que utilizam duas polias em "V", capazes de aumentar ou diminuir seus diâmetros de trabalho por ação de parafusos. As duas polias em "V" são ligadas entre si por uma correia de borracha e lona, com dentes de fibra, madeira ou mesmo por corrente metálica. As polias em "V", quando acionadas pelo parafuso de ajuste, sofrem variações em seus diâmetros. Digamos, por exemplo, que uma delas - a Polia Motriz - aumentou o seu diâmetro para um determinado valor quando movimentado o parafuso de ajuste. Essa movimentação do parafuso provocou uma diminuição exatamente igual no diâmetro da polia movimentada. Assim sendo, com o auxílio destes mecanismos, poderemos ajustar a velocidade do acionamento. Para que estes mecanismos funcionem bem, é necessário que não existam quaisquer folgas nas transmissões mecânicas do acionamento, bem como no próprio P.I.V.

3.2.2 *VARIADORES HIDRÁULICOS*

3.2.2.1 *MOTOR HIDRÁULICO*

Este método permite variação contínua de velocidade. O motor hidráulico de deslocamento positivo é projetado e desenvolvido para converter a potência hidráulica de um fluído em potência mecânica. Esta conversão é feita através de um dispositivo de engrenagens planetárias ou através de acionamento de pistões com controle efetuado por válvulas e que permite se obter as seguintes características:

- Baixa rotação (5 a 500 rpm aproximadamente);
- Elevado torque;

- Permite rotação nos dois sentidos;
- Motores de baixa potência;
- Baixo custo.

Para o acionamento dos motores hidráulicos é necessário que se tenha um sistema hidráulico a disposição (tubulações, bombas, motores elétricos auxiliares), que faz com que, em uma análise global do conjunto, o sistema tenha um rendimento baixo e um nível de manutenção elevado pela existência de várias partes mecânicas. O controle da variação de velocidade do motor é feita através da pressão do fluido injetado no motor (quanto maior a pressão, maior a velocidade) que é feito através de válvulas de estrangulamento no circuito hidráulico, ocasionado perdas elevadas.

3.2.2.2 *VARIADOR HIDRÁULICO OU HIDRODINÂMICO*

Este método permite variação contínua de velocidade. O sistema consiste basicamente em um variador de velocidade de princípio hidrocinético, composto de um eixo de entrada, de rotação fixa, e de um eixo de saída, cuja rotação pode variar linearmente de zero até uma rotação muito próxima à do eixo de entrada. O princípio de operação pode ser demonstrado pelo seguinte: Colocando-se dois ventiladores frente a frente e fazendo-se a hélice de um deles girar, a hélice do segundo ventilador irá começar a girar também ao receber a corrente de ar. Se não houvesse perdas, a rotação do segundo ventilador seria praticamente a mesma que a do ventilador acionador. Agora se colocarmos entre os dois ventiladores uma folha de papelão, poderemos diminuir ou aumentar a rotação do segundo ventilador conforme o desejado, em função do fluxo de ar existente. No variador hidráulico, no lugar de ar usa-se óleo como fluido, e em vez das hélices, são usados discos aletados que são alojados em uma caixa fechada, montada sobre dois eixos independentes. Dentro desta caixa é colocado óleo até um nível determinado.

a) Discos de transmissão
b) Coroa com a sua abertura central
c) Colher articulada
d) Sensor com o seu diafragma
e) Mola de regulagem
f) Botão de regulagem
g) Tanque de captação de óleo
h) Intercambio de calor
i) Furo de alimentação do óleo
j) Eixo do motor de RPM constante
k) Eixo de RPM variável
l) Furo de saída do óleo
m) Termômetro de controle
n) Corpo
o) Tampa de montagem e inspeção

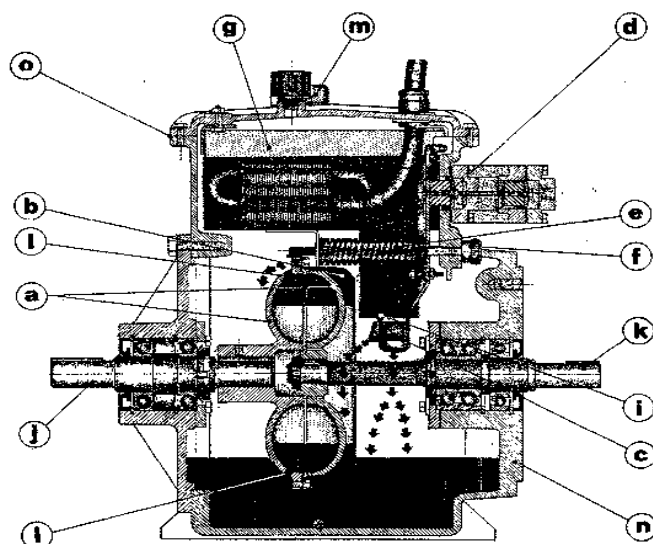



Figura 3.5 - Sistema de variação por variador hidráulico

3.2.3 *VARIADORES ELETROMAGNÉTICOS*

3.2.3.1 *EMBREAGENS ELETROMAGNÉTICAS*

Com os variadores eletromagnéticos mudou-se o conceito de variação exclusivamente mecânica para variação eletromecânica propriamente dita, através de técnicas baseadas nos princípios físicos das correntes de Foucault, utilizando um sistema de discos acoplados a bobinas que podem ter o seu campo magnético variável, variando-se assim o torque (e também a velocidade) na saída do variador. Algumas limitações devem ser observadas para a aplicação deste equipamento:

- A rotação máxima de saída é sempre a nominal do motor, nunca além desta;
- Aqui também o motor sempre estará girando na rotação nominal, independente da rotação desejada no eixo de saída. Isto proporciona um consumo inadequado (desperdício de energia), quando se opera em rotações abaixo da rotação nominal;
- O rendimento deste tipo de acionamento é muito baixo, pois apresenta perdas por aquecimento e ruído;
- As manutenções preventivas e corretivas são freqüentes, pois existem muitas partes girantes as quais necessitam de ajustes constantes e substituições periódicas.

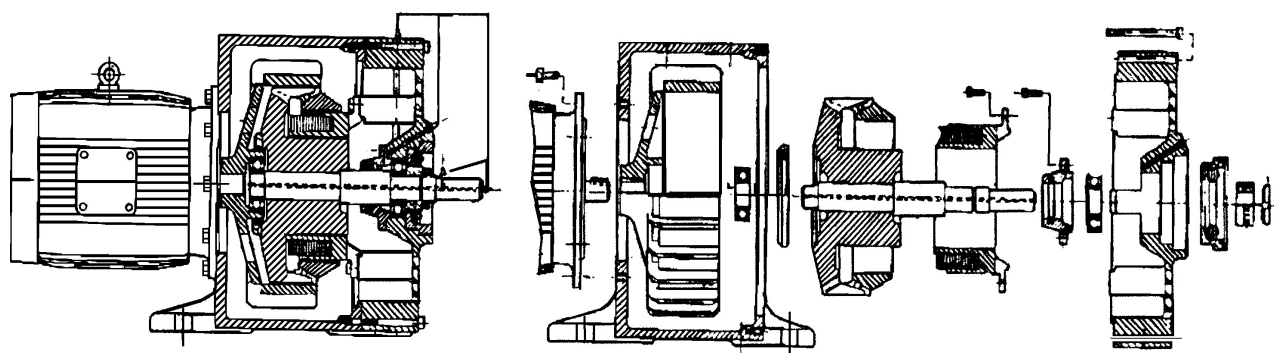



Figura 3.6 - Sistema de variação por variador eletromagnético

3.2.4 *VARIADORES ELETROELETRÔNICOS*

3.2.4.1 *ACIONAMENTO COM MOTOR COMUTADOR DE CORRENTE ALTERNADA*

Este método permite variação contínua de velocidade. O motor comutador de corrente alternada (MOTOR SCHRAGE), cuja principal característica é a possibilidade de variar a rotação, são construídos para alimentação trifásica e monofásica. Os motores comutadores monofásicos encontram aplicação em tração elétrica, enquanto os motores comutadores trifásicos são usados para acionamentos industriais.

Um diagrama esquemático para o motor Schrage é mostrado na figura a seguir. O rotor deste motor é provido de dois enrolamentos. O primeiro (w_1), servindo como o primário, recebe a fonte de alimentação através de um conjunto de anéis deslizantes.

O segundo enrolamento (wr) é ligado a um comutador semelhante ao enrolamento de armadura de um motor CC.

Um terceiro enrolamento (ws) é colocado no estator, conectando cada uma das suas fases as respectivas escovas no comutador.

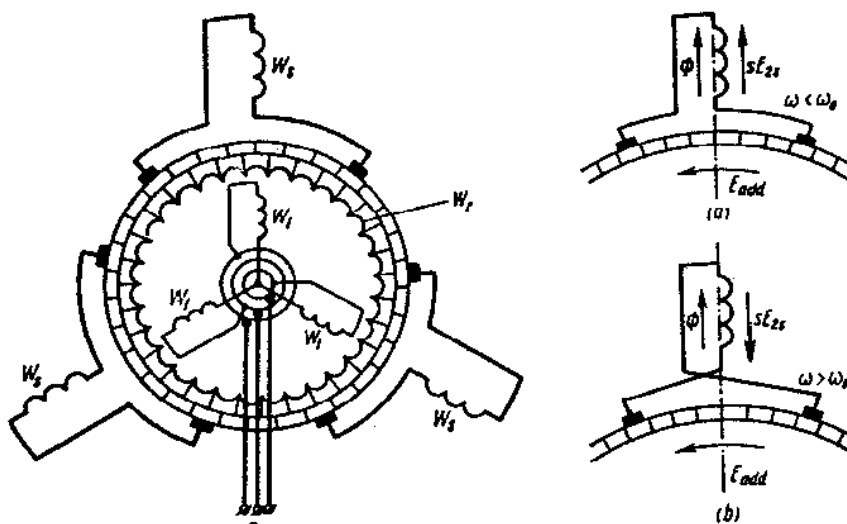



Figura 3.7 - a) Distribuição de enrolamentos no motor comutador de corrente alternada. b) Posição das escovas no comutador.

A velocidade do motor comutador é controlada pela variação simétrica da distância entre as escovas em relação ao respectivo eixo da fase do estator. Se as escovas são colocadas em repouso no mesmo segmento do comutador do eixo desta fase, isto significa que este motor operará como um motor de indução simples sem comutador.

A curva conjugado x escorregamento típica pode ser visto na figura a seguir.

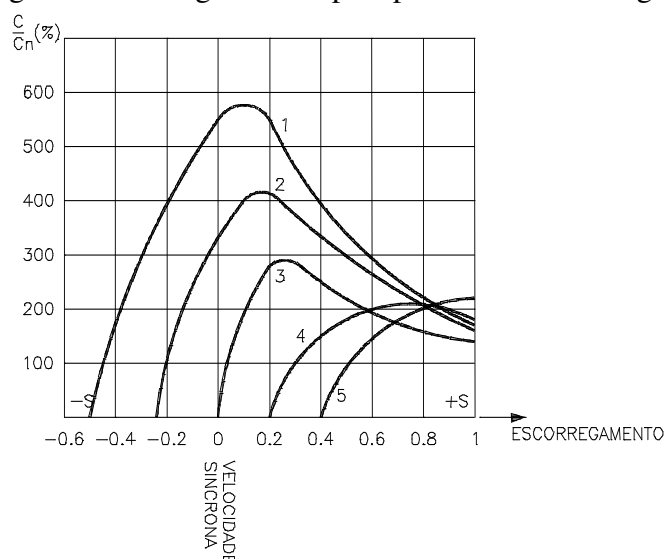



Figura 3.8 - Curva característica de conjugado x rotação

Com o propósito de limitar a corrente de partida, um reostato de partida pode ser inserido no circuito de alimentação do estator. O motor Schrage tem usualmente uma faixa de

controle de velocidade da ordem de 3:1. Qualquer necessidade de aumento da faixa de variação de velocidade causará o aumento das dimensões do motor resultando em um custo maior. O controle de velocidade com este tipo de motor prova ser efetivo porque as perdas são baixas.

O controle de velocidade pode ser feito acima ou abaixo da velocidade base. Desde que o fluxo magnético no enrolamento primário permaneça constante, o controle de velocidade será economicamente vantajoso quando aplicado a uma carga de torque constante.

Os motores comutadores de corrente alternada possuem mais desvantagens do que os motores CC devido aos limites maiores de comutação. Devido a isto, os motores Schrage de três enrolamentos são construídos com um sensível aumento de dimensões e de custos em comparação com motores CC. Este tipo de motor portanto pode ser usado em aplicações onde faixa de variação de velocidade seja de 3:1 e onde o ciclo de trabalho não seja intermitente.

3.2.4.2 *ACIONAMENTO COM MOTOR ASSÍNCRONO DE ANÉIS*

Este método permite tanto variações contínuas como também discretas de velocidade. Neste caso, a velocidade do campo girante é mantida constante, e a velocidade do rotor é alterada de acordo com as condições exigidas pela carga, através de:

a) variação da resistência rotórica;
b) variação da tensão do estator;
c) variação de ambas, simultaneamente.

Estas variações tem como conseqüência o aumento das perdas rotóricas, o que limita a utilização desse sistema.

3.2.4.2.1 *VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA ROTÓRICA*

A variação da resistência do rotor somente é possível externamente ao mesmo. Portanto, este método limita-se apenas às aplicações com motor de rotor bobinado (de anéis). Pode-se conseguir o efeito de variação de velocidade através da variação da resistência do circuito rotórico da máquina, com tensão estatórica constante. Com o aumento da resistência, reduz-se inicialmente a corrente rotórica. Para manter-se o conjugado motor, a corrente deve ser aumentada através do aumento da tensão induzida, que é obtida, por sua vez, pelo crescimento do escorregamento. Geralmente, tais resistências são ligadas em estágios através de contatores, ou reostatos. Com o auxílio de uma ponte retificadora e tiristor existe a possibilidade de variação da resistência do rotor de forma contínua e sem comutação mecânica. Liga-se uma chave eletrônica (tiristor) em paralelo com uma resistência, que periodicamente abre e fecha. Alimentando-se este circuito com uma corrente contínua, pode-se variar a resistência em relação a fonte, através da variação da relação entre o tempo de ligação e o tempo de desligamento da chave. Este processo apresenta perdas ôhmicas na resistência.

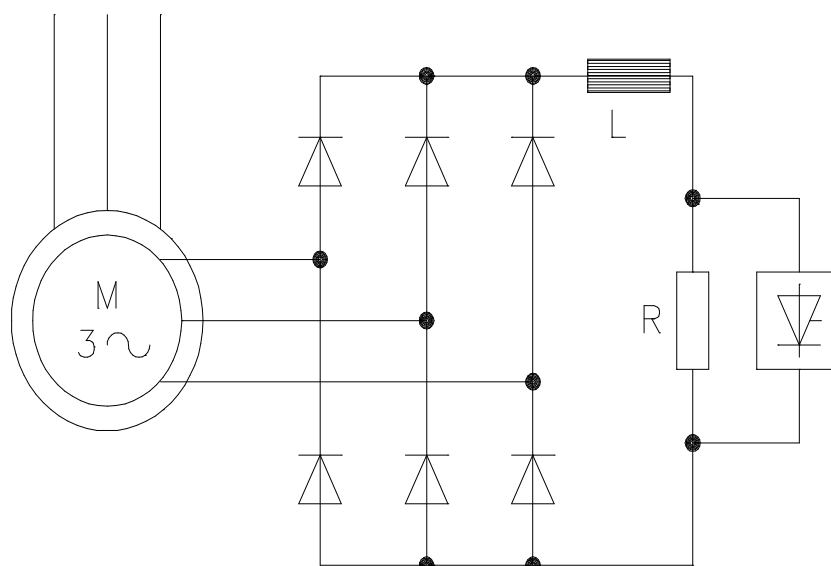



Figura 3.9 - Sistema de variação com ponte retificadora e tiristor.

O conjugado de partida define o valor máximo da resistência R. Em função disto, este valor limita a faixa de variação de velocidade através do controle da variação de resistência do rotor, especialmente com a diminuição do conjugado resistente. O reator L deve evitar um curto-circuito para o dispositivo de regulação fechado, e ao mesmo tempo promover uma circulação contínua de corrente no circuito CC.

OBSERVAÇÕES E CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES:

1) A faixa de controle da velocidade depende da carga;
2) A medida que a velocidade é reduzida, o motor perde consideravelmente a característica de pequena variação de velocidade em função de variações de carga;
3) Para utilizar-se completamente o motor, as mudanças de velocidade deveriam ser feitas com torque constante;
4) As perdas no circuito rotórico são proporcionais ao escorregamento e bastante significativas para conjugado resistente constante em toda faixa de velocidade.

Em função destes aspectos, este sistema é utilizado principalmente em:

- aplicações de operação intermitente (curta duração), por exemplo: equipamentos de içamento como guindastes, talhas, guinchos, etc;
- cargas com característica de conjugado quadrático, desde que a faixa de variação de velocidade seja pequena;
- faixa de potência típica: 5 a 50 kW.

3.2.4.2.2 *SISTEMA DE CONEXÃO CASCATA*

Em motores de indução em conexão cascata, a energia transferida do estator para o rotor, devido ao escorregamento, (P_2 = s.P_1) não é perdida, como nos sistemas descritos anteriormente, mas é devolvida, depois da respectiva conversão ao circuito de alimentação, através um conversor rotativo (RC) (chamada CASCATA ELÉTRICA) ou ao eixo de um motor (chamada CASCATA ELETROMECÂNICA).

0,O princípio do controle de velocidade consiste na introdução de uma contratensão no rotor contrária a f.e.m. induzida. O efeito é o mesmo que para variação de resistência rotórica. Quanto maior a contratensão, maior deve ser a f.e.m. induzida no rotor para que o conjugado motor seja mantido. Para vencer um determinado conjugado resistente, deve circular no circuito do rotor uma corrente I_2.

Para conjugado resistente constante, introduzindo-se no circuito do rotor uma contratensão E_a, a tensão E_2 deve aumentar do mesmo valor para que a corrente rotórica seja mantida. Temos então, desprezando-se a variação de X_{d2} com a freqüência, a seguinte equação para a corrente rotórica:

$$I_2 = \frac{E_2 - E_a}{\sqrt{R_2^{\,2} + X_{d2}^{\,2}}}$$

Assim, a tensão E_2 só pode ser aumentada com o aumento da freqüência do rotor. Como $f_2 = f_1 - f$, onde f = freqüência de rotação do eixo, então a velocidade deve diminuir, para que, com a freqüência de rede (f_1) constante, a freqüência do rotor (f_2) seja aumentada

Algumas das variantes possíveis de conexão cascata para controle de velocidade de motor de indução são mostradas abaixo:

Onde: RC é um conversor rotativo que converte a energia devido ao escorregamento em energia CC.

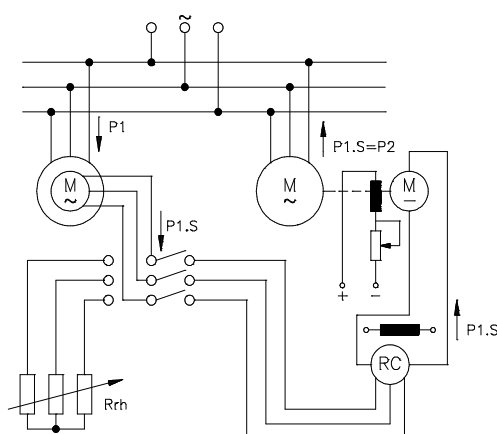



Figura 3.10 - Cascata elétrica com retificação por conversor rotativo.

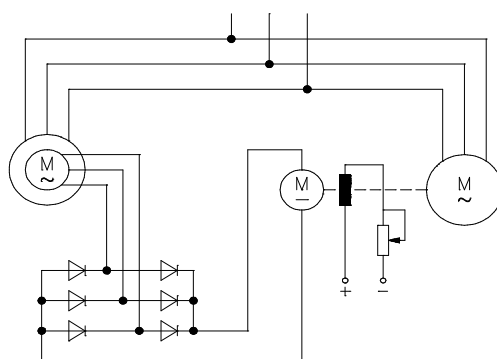



Figura 3.11 - Cascata elétrica com retificador a diodos.

O motor de indução principal é partido com o auxílio do reostato R_{rh}. Tão logo o motor gire suficientemente próximo de sua velocidade síncrona, o circuito rotórico é chaveado no sentido de conectar seus anéis coletores aos respectivos terminais do conversor rotativo, que gira a uma velocidade síncrona correspondente a freqüência de escorregamento.

No lado CC, o conversor rotativo é conectado à armadura do motor CC. O controle de velocidade é exercido pela variação da corrente de campo do motor CC. Um aumento na corrente de campo e, portanto, aumento da f.c.e.m. do motor, acarretará na diminuição da corrente de armadura do conversor rotativo. Isto, por sua vez, leva à uma redução na corrente CA que flui no rotor do motor de indução principal.

Um decréscimo na corrente rotórica resulta em uma queda no torque do motor principal. Se o torque da carga permanecer inalterado, um decréscimo no torque do motor causará uma desaceleração e operação em algum valor mais baixo de velocidade. Quando isto acontece o escorregamento aumenta, a tensão e a freqüência através dos anéis do motor principal e do conversor rotativo aumentam. Um aumento da corrente ocorrerá até que o torque do motor se iguale ao da carga.

Portanto, a energia transferida do estator para o rotor, devido ao escorregamento, no motor de indução principal, por meio do conversor rotativo e dos motores auxiliares CC e CA, é devolvida à rede de alimentação. A utilização completa da capacidade do motor neste método de controle de velocidade é alcançada com torque de saída constante. A outra variação de conexão CASCATA ELETROMECÂNICA é mostrada a seguir:

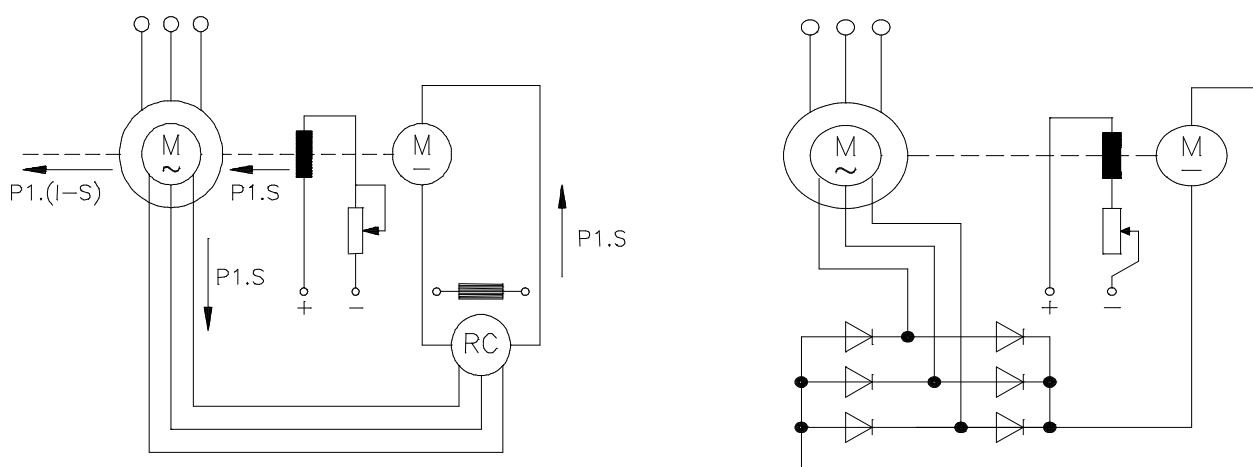



Figura 3.12 - Cascata eletromecânica: a) com retificação com conversor rotativo
b) com retificação a diodos

O motor de indução principal é partido da mesma forma que no esquema anterior. A potência rotórica, devido ao escorregamento, P_2 (menos as perdas) neste caso é devolvida ao eixo do motor principal como potência mecânica por meio do motor CC.

Desprezando as perdas nas máquinas da cascata, é evidente que a potência mecânica no eixo do motor é:

$$P_{mec} = P_1 \times (1 - s)$$

À esta potência deve ser adicionada a potência de escorregamento $P_2 = s \cdot P_1$, que é devolvida ao eixo do motor principal, por meio do motor CC e do conversor rotativo.

Deste modo, sem considerar o valor que o escorregamento possa ter, e consequentemente a velocidade, a potência de saída do motor principal pode ser mantida constante. É por isso que este tipo de cascata eletromecânica é chamada de CASCATA DE POTÊNCIA CONSTANTE.

OBSERVAÇÕES:

a) Com respeito às perdas de energia, o controle de velocidade por conexão cascata demonstra ser econômico.

b) Com as conexões cascata consideradas acima, a faixa de controle de velocidade está praticamente limitada à valores de 1:1,5 a 1:2. Algum aumento adicional na faixa requer um conversor rotativo e motor CC de tamanho extra.

3.2.4.2.3 *CASCATA SUBSÍNCRONA*

A cascata sub-síncrona, também chamada de cascata de conversores reguladores, é obtida da substituição de uma cascata de máquinas por um dispositivo semicondutor e um transformador. A cascata de conversores reguladores substitui o conversor rotativo por um retificador e o conjunto motogerador do lado da rede por um inversor controlado pela rede.

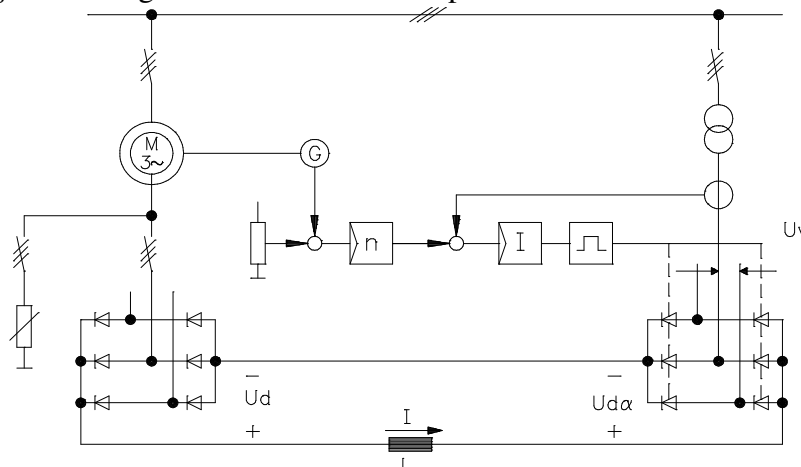



Figura 3.13 - Cascata sub-síncrona

Onde: Ud = Tensão rotórica retificada (link DC).
Uv = Tensão CA na saída da ponte inversora.

A contratensão, necessária à regulação do escorregamento (controle de velocidade), é fornecida pelo inversor. O valor desta contratensão é ajustado continuamente através de variação do comando regulador. Ela é, ao contrário da operação com resistências de ajuste, independente da carga.

Com o aumento da contratensão as características da curva de conjugado são deslocadas para a esquerda, conforme gráfico a seguir. Para α = 150º (ângulo de disparo dos tiristores da ponte inversora) obtém-se a maior contratensão. Uma redução maior de velocidade não é possível, pois não se utiliza ângulos de disparo maiores que 150º por motivos de comutação dos tiristores.

O maior conjugado a ser vencido pelo acionamento é limitado pela corrente para a qual a cascata foi definida.

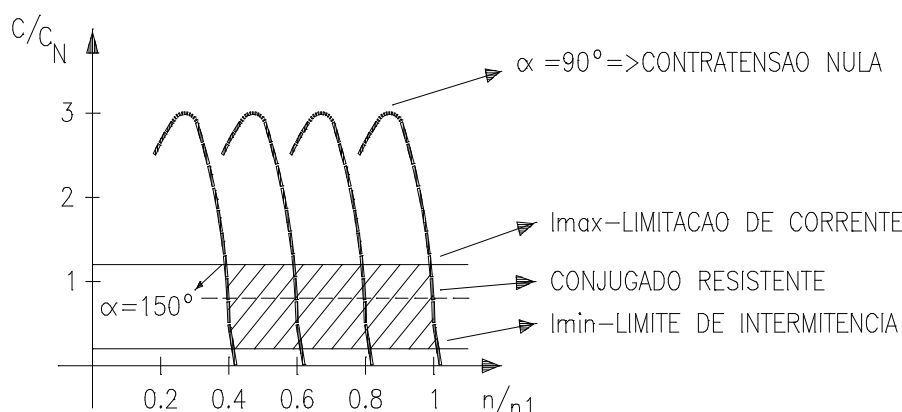



Figura 3.14 - Curva conjugado x velocidade do motor utilizando cascata sub-síncrona em função do ângulo de disparo α.

**** OBSERVAÇÕES IMPORTANTES:***

1) A tensão (Uv) é definida pela escolha da relação de transformação do transformador, de modo que resulte a contratensão correspondente a faixa de variação da velocidade e a tensão de partida do rotor;

2) As correntes no circuito do rotor não são senoidais e tem uma freqüência baixa, variável com a velocidade.

3) O torque desenvolvido pelo motor é proporcional a corrente rotórica, isto é, a corrente CC da cascata, enquanto a tensão rotórica é proporcional ao escorregamento do motor;

4) Portanto, os valores da cascata dependem do torque requerido com referência à corrente, e da faixa de controle do acionamento com referência à tensão.

5) Para reduzir os valores nominais do acionamento, muitas vezes, os mesmos são partidos com o uso de resistores para converter a potência do escorregamento em calor durante o processo de partida. Depois, atingido 75% a 100% da velocidade nominal, o sistema conversor é conectado aos enrolamentos do rotor.

6) Outro aspecto importante é o fato de que principalmente no caso de bombas e ventiladores, aonde a faixa de controle está muitas vezes limitada de 70% a 100% da rotação nominal, o equipamento de controle necessita somente ser dimensionado

para aquela parte da potência do motor que será devolvida à rede, o que representa uma apreciável redução no custo do mesmo.

7) Temos como faixas de aplicação típicas a potência de 500 a 20000 kW, velocidades entre 500 a 3000 rpm, operação em 1 quadrante (sem frenagem), faixa típica de regulação de 1:2 e fator de potência entre 0,7 e 0,85 (nominal do motor).

A seguir temos uma configuração variante de cascata sub-síncrona, com o uso de transformador com tap`s para redução dos valores nominais do conversor, também chamado de SISTEMA SCHERBIUS.

Este sistema é utilizado predominantemente para médias e altas potências (onde os motores podem ser conectados diretamente à redes de alta tensão de 2,3 kV a 13,8 kV e em faixas de controle de velocidade pequenas, próximas da velocidade nominal, principalmente em: Bombas, Ventiladores, Exaustores e Compressores.

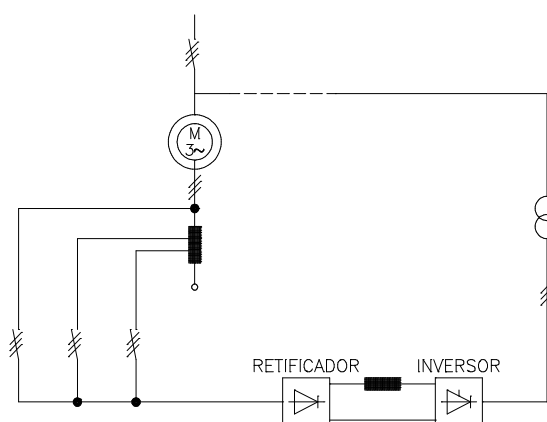



Figura 3.15 - Cascata sub-síncrona com autotransformador

3.2.4.3 *ACIONAMENTO COM MOTOR ASSÍNCRONO DE ROTOR GAIOLA*

Os sistemas de variação de velocidade em motores assíncronos podem ser divididos em dois grupos: variação discreta ou variação contínua.

Para um motor assíncrono, a variação discreta pode ser feita através da variação do número de pólos, e a variação contínua feita pela variação de freqüência, tensão ou escorregamento.

Para os motores assíncronos, a relação entre velocidade, freqüência, número de pólos e escorregamento é expressa por:

$$n = \frac{120.f.(1-s)}{2p}$$

Onde: n = Rotação em [rpm];
f = Freqüência [Hz];
p = Número de pares de pólos;
s = Escorregamento.

Analisando a fórmula, podemos ver que para variar a velocidade de um motor assíncrono, podemos atuar nos seguintes parâmetros:

a) p = Número de pares de pólos (variação discreta);
b) s = Escorregamento (variação contínua);
c) f = Freqüência da tensão de alimentação (variação contínua).

3.2.4.3.1 *VARIAÇÃO DO NÚMERO DE PÓLOS*

Existem três formas de variar o número de pólos de um motor assíncrono, quais sejam:

a) múltiplos enrolamentos separados no estator;
b) um enrolamento com comutação de pólos;
c) combinação dos dois anteriores.

Em todos estes casos, a variação de velocidade será discreta, sem perdas, porém, a carcaça será maior do que a de um motor de velocidade única.

3.2.4.3.1.1 MOTORES DE DUAS VELOCIDADES COM ENROLAMENTOS SEPARADOS

Esta versão apresenta a vantagem de se combinar enrolamentos com qualquer número de pólos, porém, limitada pelo dimensionamento eletromagnético do núcleo (estator/rotor) e carcaça geralmente bem maior que a de velocidade única.

3.2.4.3.1.2 MOTORES DE DUAS VELOCIDADES COM ENROLAMENTO POR COMUTAÇÃO DE PÓLOS

O sistema mais comum que se apresenta é o denominado Ligação DAHLANDER. Esta ligação implica numa relação de pólos de 1:2 com conseqüente relação de rotação de 1:2.Podem ser da seguinte forma:

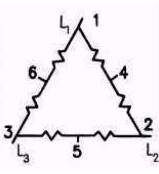
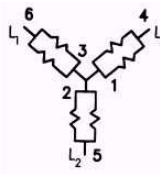
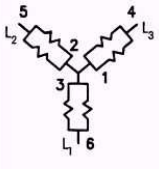
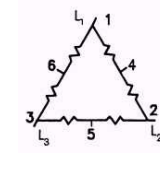
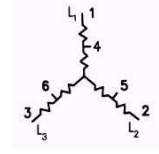
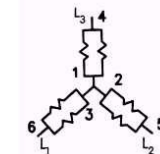
- Conjugado Constante: O conjugado nas duas rotações é constante e a relação de potência é da ordem de 0.63:1. Neste caso o motor tem uma ligação de Δ/YY. Este caso se presta às aplicações cuja curva de torque da carga permanece constante com a rotação.
- Exemplo: Motor 0.63/1cv - IV/II pólos - Δ/YY.
- Potência Constante: Neste caso, a relação de conjugado é de 1:2 e a potência permanece constante. O motor possui uma ligação YY/Δ. Exemplo: 10/10cv - IV/II pólos - YY/Δ
- Conjugado Variável: Neste caso, a relação de potência será de aproximadamente 1:4. É muito aplicado às cargas como bombas, ventiladores. Sua ligação é Y/YY. Exemplo: 1/4cv - IV/II pólos - Y/YY.

ROTAÇÃO		
TIPO	**BAIXA**	**ALTA**
Conjugado Constante		
Potência Constante		
Conjugado Variável		

Figura 3.19 - Resumo das ligações Dahlander

3.2.4.3.1.3 *MOTORES COM MAIS DE DUAS VELOCIDADES*

É possível combinar um enrolamento Dahlander com mais um enrolamento convencional, entretanto, essa prática não é comum e somente utilizado em aplicações muito especiais. Por exemplo, um motor Dahlander de 4/8 pólos mais um enrolamento de 6 pólos (motor de 4/6/8 pólos).

3.2.4.3.2 *VARIAÇÃO DO ESCORREGAMENTO*

A variação do escorregamento em um motor de indução com rotor gaiola é obtido através da variação da tensão estatórica. É um sistema pouco utilizado, uma vez que também gera perdas rotóricas e a faixa de variação da velocidade é pequena.

Reduzindo-se a tensão de alimentação do estator, estaremos provocando uma diminuição correspondente do fluxo magnético na máquina. Para que o conjugado motor seja mantido, a corrente do rotor deve ser aumentada. Isto é conseguido com o aumento da tensão induzida no rotor, mantendo-se a sua resistência constante. O aumento da corrente induzida, por sua vez, é obtido pelo aumento do escorregamento, consequentemente, a velocidade da máquina diminui.

OBSERVAÇÕES E CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES:

1) O conjugado é função do quadrado da tensão aplicada. Por exemplo, reduzindo-se a tensão em 70% da nominal, estaremos reduzindo o conjugado a 50% do nominal.
2) Como a dissipação de potência no circuito rotórico é proporcional ao escorregamento, temos que a operação abaixo da velocidade nominal está acompanhada de consideráveis perdas, o que limita a utilização deste sistema.
3) Em função destes aspectos, o controle de velocidade em motores de gaiola através da variação da tensão estatórica é utilizado em:
   - Aplicações de curta duração, por exemplo: partida lenta de máquinas, elevadores, etc., através de chaves compensadoras ou soft-starters.
   - Regulação de Velocidade de Ventiladores e Bombas, com variação quadrática ou cúbica do conjugado resistente e sobredimensionamento correspondente do motor.
   - Regulação de Velocidade de Pequenos Motores que possuam baixo rendimento.
   - Faixa de potência típica: 1 a 50 kW

3.2.4.3.3 *VARIAÇÃO DA FREQÜÊNCIA DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO*

Os motores podem ser controlados de modo a prover um ajuste contínuo de velocidade e conjugado com relação à carga mecânica.

O fato da velocidade dos motores de indução ser dada pela relação:

$$n = \frac{120.f.(1-s)}{2p}$$

Onde: n = Rotação em [rpm];
f = Freqüência [Hz];
p = Número de pares de pólos;
s = Escorregamento.

Sugere a possibilidade de se obter várias velocidades para um mesmo motor variando-se a freqüência. Com a variação da freqüência obtém-se uma variação contínua da velocidade, ou seja, uma forma de se conseguir variar a velocidade dos motores de indução é através da alimentação por uma fonte de freqüência variável (CONVERSORES ESTÁTICOS DE FREQÜENCIA).

Ao se variar a freqüência da tensão do estator, está sendo variada a velocidade do campo girante. Com isso, pode-se variar a velocidade do rotor, mantendo-se constante o escorregamento da máquina e, portanto, as perdas podem ser otimizadas de acordo com as condições da carga.

3.3 CONVERSORES ESTÁTICOS DE FREQÜÊNCIA

3.3.1 *INTRODUÇÃO*

O mais eficiente método controle de velocidade de motores de indução trifásicos, com menores perdas no dispositivo responsável pela variação da velocidade, consiste na variação da freqüência (f_1) da fonte alimentadora através de conversores de freqüência, onde o motor pode ser controlado de modo a prover um ajuste contínuo de velocidade e conjugado com relação à carga mecânica.

Conforme visto no capítulo II, através do equacionamento da máquina assíncrona, sabemos que, para o conjugado desenvolvido pelo motor assíncrono vale a seguinte relação:

$$C = \phi_m . I_2$$

e que o fluxo depende da relação U_1/f_1, desprezando-se a queda de tensão na resistência R_1 e na reatância de dispersão X_{d1} do estator, pode-se dizer que :

$$\phi_m = \frac{U_1}{f_1}$$

Onde: ϕ_m = Fluxo de magnetização;
I_2 = Corrente do rotor;
U_1 = Tensão estatórica;
f_1 = Freqüência da rede.

Para possibilitar a operação do motor com torque constante para diferentes velocidades, deve-se fazer variar a tensão U_1 proporcionalmente com a variação da freqüência f_1 mantendo desta forma o fluxo constante.

3.3.2 *TIPOS DE CONVERSORES ESTÁTICOS DE FREQÜÊNCIA*

Um conversor de freqüência converte a tensão da rede de amplitude e freqüência constantes em uma tensão de amplitude e freqüência variáveis. Esta conversão, pode ser obtida direta ou indiretamente :

- ***Conversão Direta***: onde se enquadram os cicloconversores;
- ***Conversão Indireta***: onde se enquadram os conversores com Circuito Intermediário.

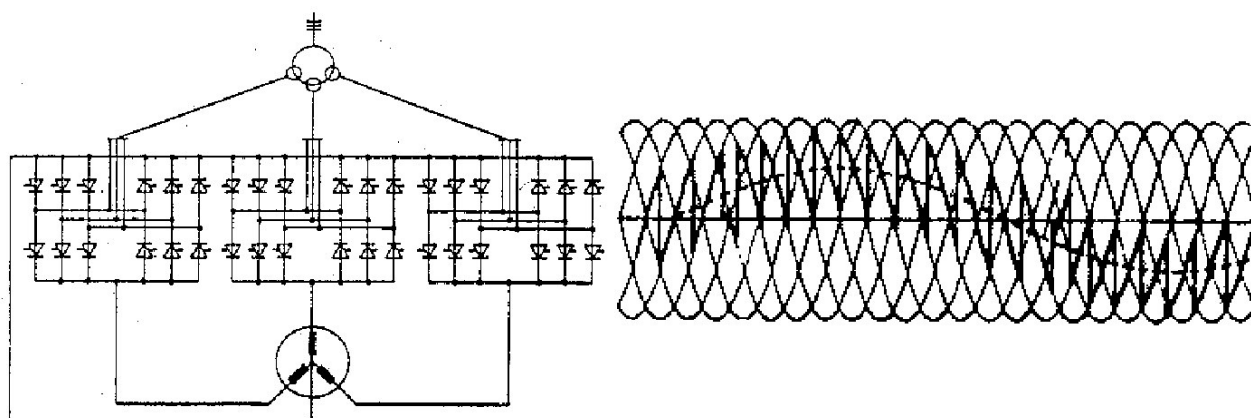



Figura 3.20 - a) Cicloconversor b) Formação da tensão

3.3.2.1 *CONVERSOR REGULADOR DIRETO – CICLOCONVERSORES*

O cicloconversor é um conversor regulador direto comutado pela rede, isto é, a tensão de comutação é fornecida diretamente pela rede de alimentação.

Conforme a figura acima, ele consiste de 6 pontes trifásicas as quais em pares alimentam cada uma das fases da carga. As duas pontes, de cada fase, assim operam em um circuito antiparalelo, isto é, uma ponte fornece a corrente positiva e a outra ponte fornece a corrente negativa do meio ciclo de uma fase da carga (motor).

As tensões de saída são obtidas pelo controle dos pulsos da tensão secundária do transformador do conversor. A freqüência de saída pode ser determinada pela seleção dos intervalos de mudança da ponte direta para a ponte reversa. Este tipo de conversor é usado principalmente onde baixas freqüências (0 a 20Hz) são ajustadas continuamente e em acionamentos de grandes potências. Isto se deve ao fato de que para freqüências maiores que 20 Hz, o intervalo de disparo dos tiristores para geração de uma onda fundamental de tensão já não é mais possível, pois ocorre uma distorção excessiva na forma de onda de saída, não existindo o comportamento de uma senóide.

Exemplos de utilização:

- Laminadores de Tubo, com motores síncronos a baixa velocidade (12 a 20 rpm);
- Refundição de Escórias, onde freqüências de 0 a 10 Hz são requeridas;
- Moinhos de cimento, com motores síncronos de baixa rotação (velocidade até 15 rpm), com elevado número de pólos.

3.3.2.2 *CONVERSOR REGULADOR INDIRETO - CONVERSORES COM CIRCUITO INTERMEDIÁRIO*

O conversor indireto é composto de um retificador (controlado ou não) que produz uma tensão contínua, e um inversor que produz a partir desta tensão contínua uma tensão alternada de freqüência variável. O desacoplamento entre o retificador e o inversor é feito com um circuito

intermediário (link DC), de tal forma que a formação da tensão de saída é completamente independente da rede em termos de tensão e freqüência.

Os conversores indiretos podem ainda ser classificados quanto às características de seu circuito intermediário :

- Circuito Intermediário com Corrente Imposta;
- Circuito Intermediário com Tensão Imposta;

3.3.2.2.1 *TÉCNICA DE CORRENTE IMPOSTA*

Contrariamente ao conversor de freqüência de tensão imposta (conversores convencionais - vide item 2.2.2), onde a tensão do circuito intermediário CC é imposta ao motor e a amplitude e o ângulo de fase da corrente do motor depende da carga, nos conversores de freqüência de corrente imposta, a corrente é imposta ao motor e consequentemente a amplitude e o ângulo de fase da tensão do motor é que dependem das condições de carga do motor.

Basicamente, o conversor é composto de um retificador controlado (tiristores), um circuito intermediário CC com uma indutância responsável pela corrente imposta, e de um inversor com diodos de bloqueio e capacitores de comutação, conforme descrito na figura:

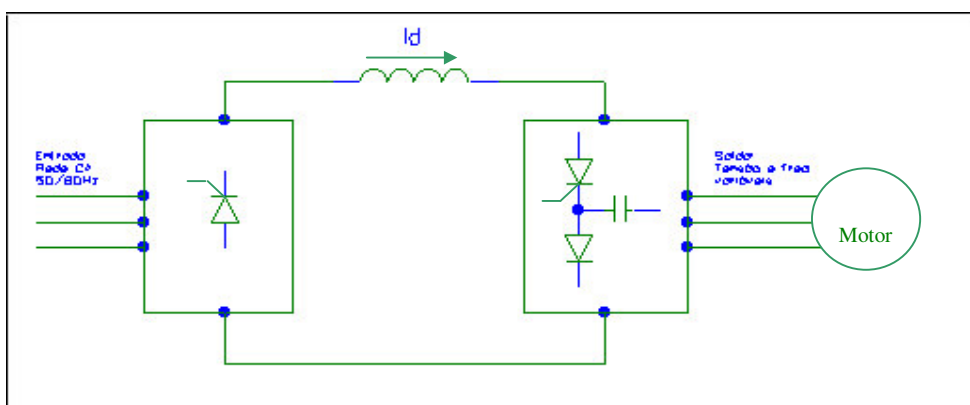



Figura 3.21 - a) Blocodiagrama de conversor por corrente imposta
b) Formas de onda de tensão e corrente.

Os diodos de bloqueio servem para desconectar os capacitores do motor. Como neste circuito a relação de fase entre a tensão e a corrente do motor ajusta-se automaticamente de acordo com a carga este conversor é capaz de devolver energia à rede. Isto acontece se o ângulo de fase está acima de 90^{o} elétricos para s<0 (máquina operando como gerador). A polaridade da tensão do circuito intermediário inverte para que o retificador de entrada (ponte de tiristores) opere como inversor e devolva energia à rede. Portanto, este conversor está apto a operar nos 4 quadrantes sem custos adicionais.

Através do inversor, a corrente definida no circuito intermediário resulta, em cada fase, em blocos de corrente (forma retangular) com 120º de duração e 60º de repouso. A tensão nos bornes da máquina é quase senoidal.

Como o dispositivo de comutação opera em função da carga, este conversor é mais adequado a acionamentos monomotores. Comparando-se com os conversores de freqüência por tensão imposta, ele apresenta as seguintes vantagens:

a) possibilidade de operação nos quatro quadrantes sem a necessidade de incremento de equipamentos adicionais;
b) circuito de comutação extremamente simples e de custo relativamente pequeno;
c) os tiristores do inversor tem aproveitamento otimizado quando a sua capacidade em função da forma retangular da corrente.

E as seguintes desvantagens:

a) o conversor e o motor devem ser adaptados um ao outro, com a corrente podendo variar dentro de certos limites;
b) os capacitores de comutação tem que estar dimensionados de acordo com as reatâncias de dispersão do motor;
c) adequado ao acionamento de um único motor (caracterizando-se desvantagem quando a aplicação requer acionamento multimotor onde não exista compromisso de funcionamento sempre de todos os motores).

Para o controle de motores síncronos o conversor de freqüência de corrente imposta possui no inversor pontes convencionais de tiristores, uma vez que o motor síncrono pode fornecer a potência reativa exigida pelo inversor para sua comutação e, portanto, sem os capacitores de comutação e diodos de bloqueio necessários para o controle de máquinas assíncronas.

Este conversor de freqüência tem aplicação garantida onde as exigências da carga são atendidas de forma melhor pelos motores síncronos. As razões principais para a escolha deste tipo de motor são :

- acionamento de grande potência aliada a uma alta velocidade;
- em motores de grande potência, estes dispõem de um rendimento consideravelmente maior do que o de um motor de indução (assíncrono);
- características torque-velocidade durante a partida sensivelmente melhor do que nos motores de indução;
- possibilidade de geração de potência reativa.

3.3.2.2.2 *TÉCNICA DE TENSÃO IMPOSTA*

Através de um conversor de freqüência de tensão imposta, a tensão do circuito intermediário CC (link DC) é imposta ao motor e a amplitude e o ângulo de fase da corrente do motor dependerá da carga a ser acionada.

Sendo necessário para este tipo de conversor a característica de se manter a relação U/f constante, para se manter o fluxo de magnetização constante e consequentemente o torque disponível no motor igual ao nominal para qualquer rotação (conforme visto anteriormente), temos que a tensão deve variar proporcionalmente com relação a freqüência.

Nos sistemas com tensão imposta existem várias formas de se obter esta relação U/f (tensão/freqüência) proporcional. Entre elas temos :

3.3.2.2.2.1 TENSÃO NO CIRCUITO INTERMEDIÁRIO VARIÁVEL

Neste sistema, o retificador de entrada é composto por tiristores que são controlados de forma a fornecer uma tensão no circuito intermediário variável em função da freqüência de saída fornecida ao motor, freqüência esta que é determinada através da ponte de tiristores que comutam (liga/desliga) em uma seqüência controlada, de forma a se obter na saída um sistema trifásico com uma forma de onda de tensão conforme descrito abaixo.

Com este sistema, é possível também utilizar-se uma ponte retificadora controlada na entrada com tiristores ligados em antiparalelo, podendo-se obter frenagem regenerativa com este conversor.

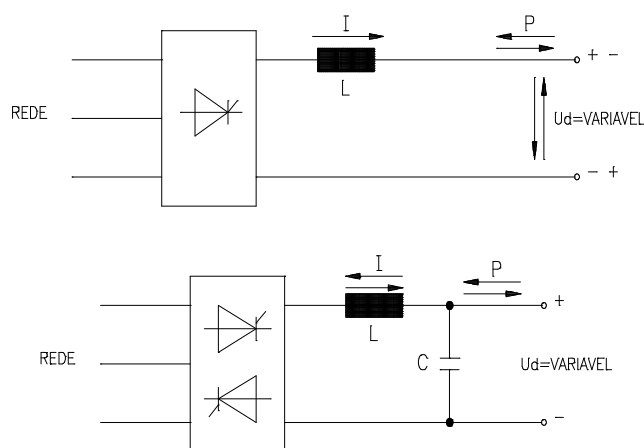



Figura 3.22 - a) Retificador controlado direto b) Retificador controlado antiparalelo

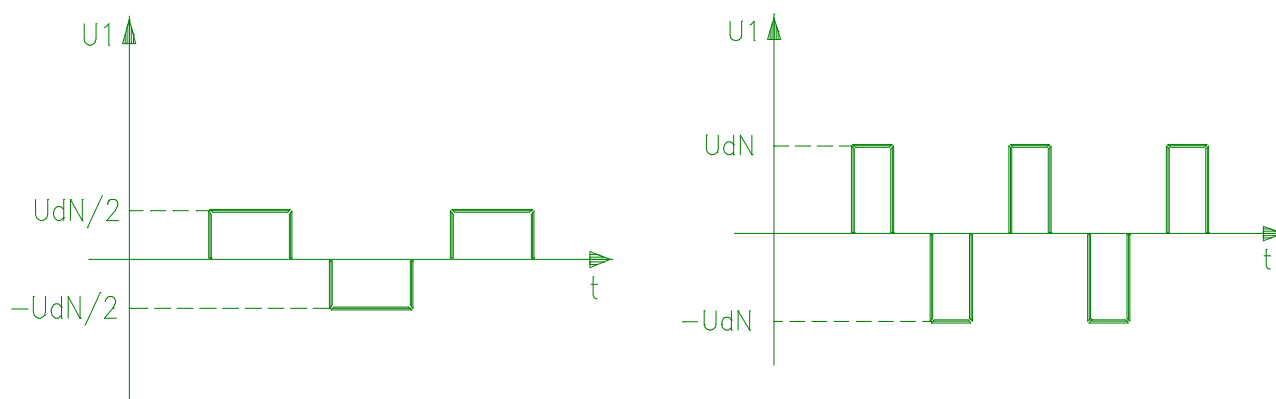



Figura 3.23 - Forma de onda de tensão e de corrente de saída com circuito intermediário variável

Um outro sistema que utiliza circuito intermediário variável é o descrito a seguir:

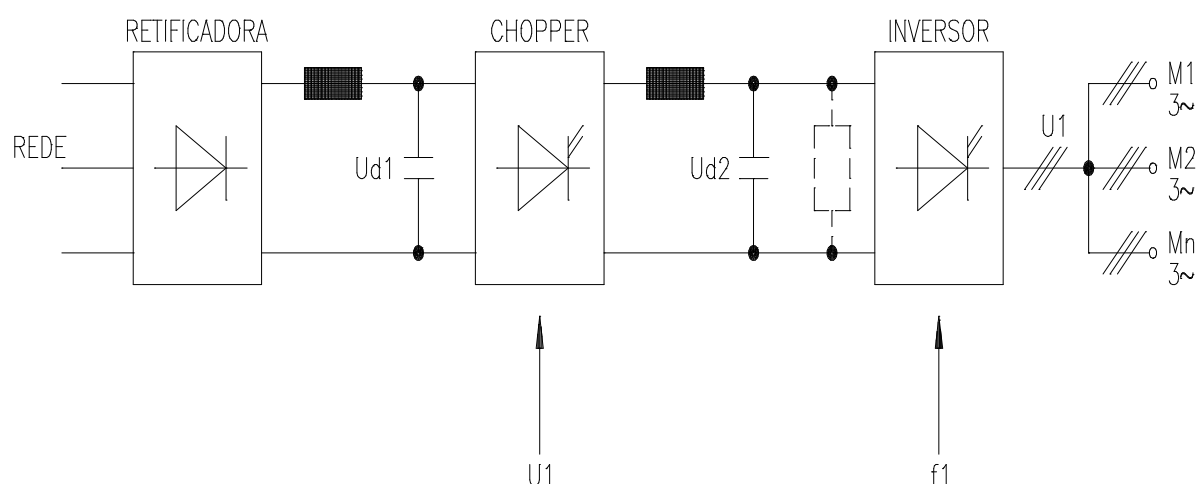



Figura 3.24 - Conversor com circuito intermediário variável através de "CHOPPER"

Através deste sistema, a entrada é formada por um retificador não controlado com uma ponte de diodos, obtendo-se uma tensão U_{d1} fixa. Em seguida esta tensão é modificada em função da freqüência de saída através do circuito CHOPPER, que é um conversor CC/CC, obtendo-se a tensão intermediária variável U_{d2}, que é aplicada à saída com freqüência variável através da ponte de transistores que comutam (liga/desliga) em uma seqüência controlada, de forma a se obter na saída um sistema trifásico com uma forma de onda de tensão conforme descrito anteriormente.

3.3.2.2.2.2 TENSÃO NO CIRCUITO INTERMEDIÁRIO CONSTANTE

Com este sistema, a tensão no circuito intermediário é constante e obtida através de uma ponte de diodos e um banco de capacitores que formam o circuito intermediário (link DC), cujo assunto será abordado em maiores detalhes no item a seguir.

3.3.3 *CONVERSORES DE FREQÜÊNCIA COM MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSOS (PWM)*

3.3.3.1 *GENERALIDADES*

Um conversor de freqüência com modulação por largura de pulsos consiste basicamente dos seguintes blocos, conforme mostra a figura a seguir:

I - Fonte de tensão contínua elaborada a partir de uma ponte retificadora (diodos) alimentada por uma rede monofásica ou trifásica;
II - Filtro capacitivo (link DC);
III - Inversor constituído de transistores de potência;

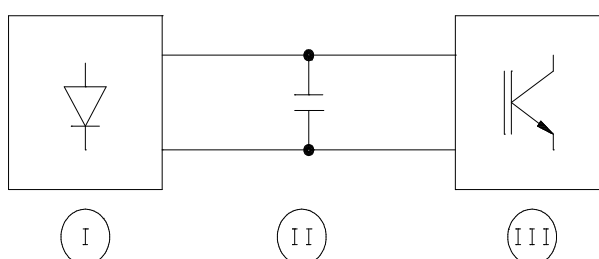



Figura 3.25 - Diagrama de blocos de conversor tipo PWM

A ponte retificadora de diodos transforma a tensão alternada de entrada em uma tensão contínua que é filtrada por um banco de capacitores. O circuito de corrente contínua é chamado de CIRCUITO INTERMEDIÁRIO. Esta tensão contínua alimenta uma ponte inversora formada por transistores de potência (BJT, IGBT ou MOSFET) e diodos de roda livre. O comando das bases dos transistores, feito pelo circuito de comando (que utiliza um microcontrolador), permite a geração de pulsos para o motor com tensão e freqüência controladas. O formato dos pulsos obedece ao princípio de modulação denominado PWM Senoidal, que permite um acionamento com corrente praticamente senoidal no motor.

A configuração do módulo é composta de transistores de potência. Usando transistores, ao invés de tiristores, evitamos a utilização de elementos de comutação para o desligamento dos tiristores, bastando remover a corrente de base dos transistores. Para formar um sistema de tensões trifásicas com um conversor, os transistores são chaveados com sinais gerados externamente, por um microcontrolador digital numa seqüência pré-estabelecida, gerando uma forma de onda retangular ou escalonada de um sistema trifásico, nos terminais de saída CA. Aumentando-se ou diminuindo-se a taxa de variação do chaveamento, pode-se alterar a freqüência do sistema trifásico gerado, inclusive aumentando a freqüência acima do valor da rede, uma vez que a conversão CC desacopla a saída da entrada. (Maiores detalhes vide anexo I). O circuito de controle é responsável pela geração dos pulsos de disparo dos transistores, monitoração e proteção dos componentes da potência, interpretação dos comandos, proteção e segurança. Comparados com tiristores, os transistores podem chavear muito mais rapidamente. Portanto, possuem uma vasta área de aplicação em inversores de alta freqüência que empregam modulação por largura de pulsos. A maior desvantagem é que os transistores necessitam de corrente contínua na base durante o estado de condução, mas o custo do circuito necessário para tal é compensado pela dispensa de elementos de comutação. A figura a seguir mostra os

componentes de potência do circuito inversor básicos para um inversor trifásico, com diodos de circulação (roda livre) e com carga trifásica (indutiva).

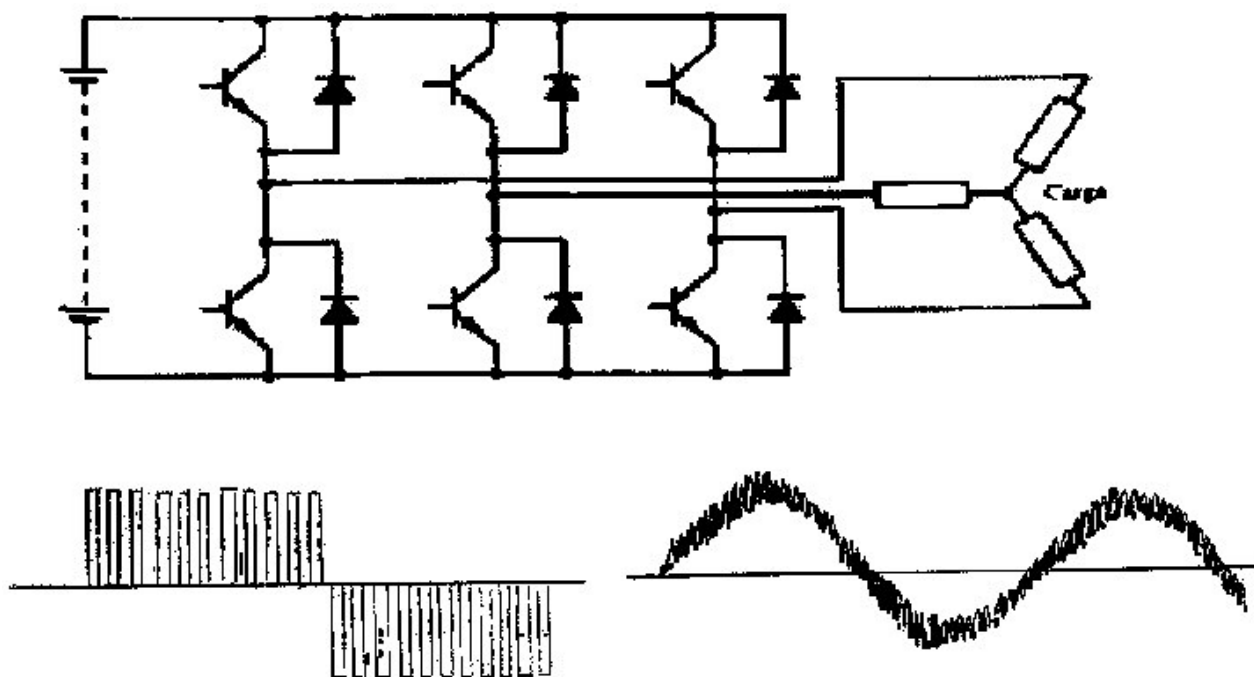



Figura 3.26 - a) Circuito inversor trifásico com transistores de potência.
b) Forma de onda da tensão de saída
c) Forma de onda da corrente de saída

A variação U/f é feita linearmente até a freqüência nominal do motor (50/60 Hz), acima desta, a tensão que já é a nominal permanece constante e há então apenas a variação da freqüência que é aplicada ao enrolamento do estator.

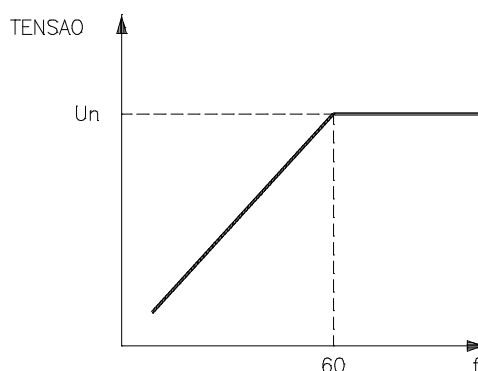



Figura 3.27 - Curva representativa da variação U/f.

Com isto determinamos uma área acima da freqüência nominal que chamamos região de enfraquecimento de campo, ou seja, uma região onde o fluxo começa a decrescer e, portanto, o torque também começa a diminuir.

Assim a curva característica conjugado x velocidade do motor acionado com conversor de freqüência pode ser colocada da seguinte maneira:

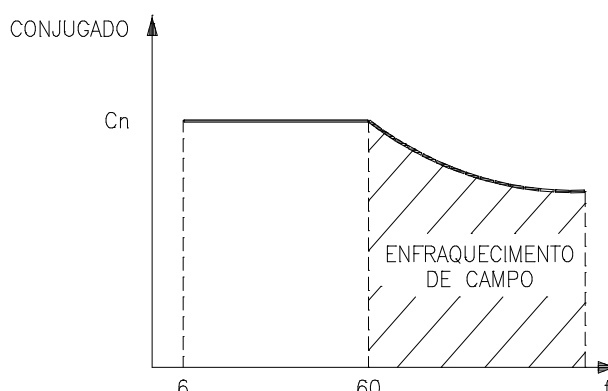



Figura 3.28 - Curva característica conjugado x velocidade

Podemos notar então, que o conjugado permanece constante até a freqüência nominal e, acima desta, começa a decrescer. A potência de saída do conversor de freqüência comporta-se da mesma forma que a variação U/f, ou seja, cresce linearmente até a freqüência nominal e permanece constante acima desta.

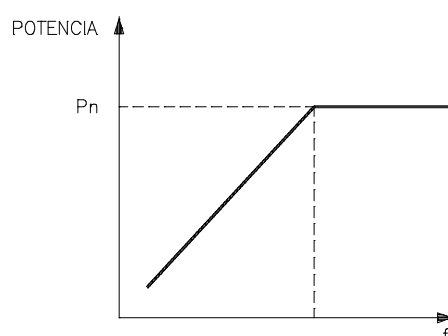



Figura 3.29 - Curva característica da potência de saída do conversor.

A figura a seguir mostra o comportamento conjugado x velocidade, idealizado da máquina assíncrona em todos os quadrantes de acionamento. Com a variação da freqüência obtém-se um deslocamento paralelo da curva característica conjugado x velocidade em relação à curva característica para freqüência nominal (50 ou 60 Hz).

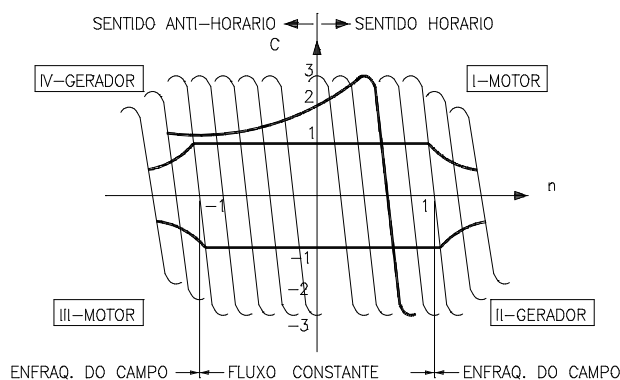



Figura 3.30-Curva característica conjugado x velocidade,
em todos quadrantes de acionamento.

Ou também de uma forma mais simplificada :

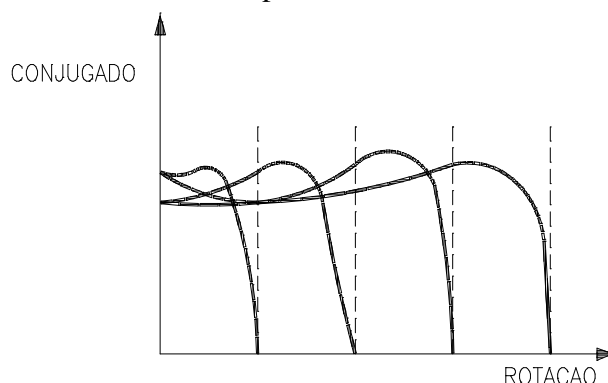



Figura 3.31 - Exemplo de curva de conjugado com tensão proporcional a freqüência.

Teoricamente existem duas faixas de atuação: uma com o fluxo constante, até a freqüência nominal, e outra, com enfraquecimento de campo, correspondente àquela acima da freqüência nominal, ou seja:

- f_s = 0 Hz até f_{nom} : U/f = constante = fluxo constante
- f_s maior do que f_{nom} : U/f = enfraquecimento de campo.

Entretanto, na realidade, para que essas duas faixas possam ser possíveis, há necessidade de se considerar os seguintes fatores:

1) Se um motor autoventilado trabalha com velocidade menor do que a nominal, terá sua capacidade de refrigeração diminuída.

2) A corrente de saída dos conversores apresenta uma forma não perfeitamente senoidal, o que implica em harmônicas de ordem superior, que provocam um aumento de perdas no motor.

Devido a isso, em caso de cargas com característica de conjugado constante (para maiores detalhes vide item capítulo V), é necessário reduzir-se o conjugado e potências admissíveis no motor. Aconselha-se normalmente seguir a seguinte curva :

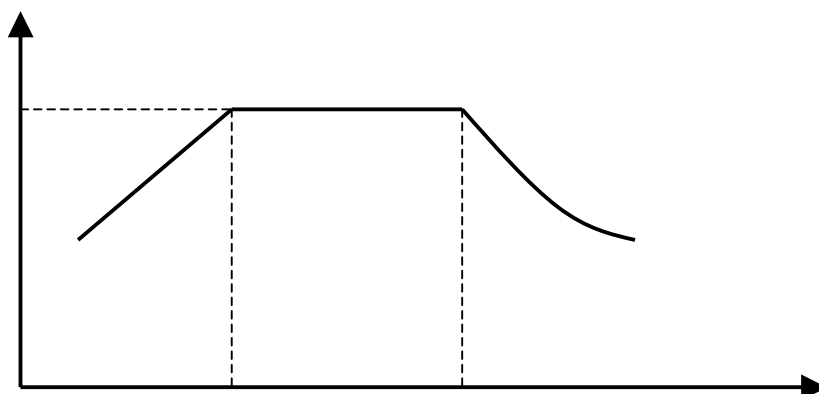



Figura 3.32 - Curva de conjugado x freqüência para uso de motor com conversor de freqüência.

3.3.3.2 *CONTROLE ESCALAR*

Entende-se por controle escalar o sistema de controle de velocidade feito por conversores de freqüência convencionais, onde é necessária apenas a variação de velocidade em aplicações normais e que não requerem elevadas dinâmicas e precisões, nem controle de torque (corrente). O circuito de potência do conversor é igual para os dois sistemas (escalar ou vetorial) conforme visto anteriormente, sendo que o que difere entre os dois é a forma com que é executado o controle de velocidade do motor.

Em um sistema com controle escalar, é possível uma precisão de velocidade de até 0,5% da rotação nominal sem variação de carga, e de 3% a 5% com variação de carga de 0 a 100% do torque nominal. Pelo princípio de funcionamento e aplicação, são utilizados na maioria das vezes motores de indução convencionais sem nenhum sistema de realimentação de velocidade (tacogerador acoplado ao motor) em malha fechada. A faixa de variação de velocidade é pequena e da ordem de 1:10 (Ex: 6 a 60 Hz).

Com estas características, o conversor de freqüência convencional (escalar), é utilizado em maior escala, pois apresenta um custo relativo menor que o conversor com controle vetorial, como também em relação a um acionamento por motor CC e conversor CA/CC.

A fim de estabelecer um comparativo da precisão de regulação de velocidade, apresentamos a seguir uma tabela com valores característicos para um motor de 3 CV, 4 pólos, com variação de velocidade feita através de conversor de freqüência em quatro situações distintas: conversor direto, conversor com ajuste de compensação de escorregamento nominal, conversor com ajuste de compensação de escorregamento otimizado e conversor realimentado por tacogerador de pulsos acoplado ao motor.

	SEM COMPENSAÇÃO						COM COMPENSAÇÃO					
CARGA	VAZIO		50%		100%		VAZIO		50%		100%	
FREQ. (HZ)	RPM	%	RPM	%	RPM	%	RPM	%	RPM	%	RPM	%
5	149	0	99	34	80	46	176	17	133	11	130	11
10	300	0	266	11	143	52	326	8	305	1,6	253	15
20	599	0	571	4,8	486	19	628	4,6	618	3	579	3,5
30	904	0	880	2,2	802	10	934	3,7	922	2,4	891	1
40	1208	0	1178	1,8	1107	7,7	1236	3	1223	1,9	1202	0
50	1507	0	1480	1,3	1415	5,6	1535	2,3	1530	2	1511	0,7
60	1807	0	1785	0,8	1715	4,7	1836	2	1820	1,1	1801	0
70	2106	0	2068	1,5	1989	5,2	2133	1,5	2114	0,6	2090	0,4
80	2404	0	2340	2,5	2262	5,7	2429	1,2	2420	0,8	2393	0,3

Tabela 3.1 - Conversor sem e com compensação de escorregamento nominal

	COM COMPENSAÇÃO OTIMIZADA						COM REALIMENTAÇÃO POR TACO					
CARGA	VAZIO		50%		100%		VAZIO		50%		100%	
FREQ. (HZ)	RPM	%	RPM	%	RPM	%	RPM	%	RPM	%	RPM	%
5	187	24	176	17	145	3,3	160	6,6	160	6,6	160	6,6
10	336	12	328	9,3	322	7,3	312	4	312	4	311	4
20	641	6,8	633	5,5	634	5,5	612	2	612	2	611	2
30	944	4,8	937	4,1	940	4,4	910	1,1	910	1,1	910	1,1
40	1250	4,1	1238	3,1	1243	3,5	1212	1	1212	1	1211	1
50	1551	3,4	1537	2,4	1551	3,4	1510	0,6	1510	0,6	1509	0,6
60	1850	2,7	1838	2,1	1833	1,8	1810	0,5	1810	0,5	1810	0,5
70	2139	1,8	2122	1	2112	0,5	2109	0,4	2109	0,4	2109	0,4
80	2435	1,4	2412	0,5	2395	0,2	2409	0,3	2409	0,3	2409	0,3

Tabela 3.2 - Conversor com compensação de escorregamento otimizado e realimentação por tacogerador de pulsos.

3.3.3.3 *CONTROLE VETORIAL*

Em aplicações onde se faz necessário uma alta performance dinâmica (resposta rápidas e alta precisão), o motor elétrico deverá fornecer essencialmente um controle preciso de torque para uma faixa extensa de condições de operações. Para tais aplicações os acionamentos de corrente contínua sempre representaram uma solução ideal, pois, a proporcionalidade da corrente de armadura, do fluxo e do torque num motor de corrente continua proporciona um meio para o controle de torque.

Contudo, a busca por avanços tecnológicos significativos, tem diminuído esta hegemonia, e gradativamente, estão crescendo as opções por novas alternativas como o uso de acionamentos em corrente alternada do tipo controle vetorial.

Principio do Controle Vetorial

Para que se tenha um controle vetorial bom é necessário que o inversor tenha a capacidade de suprir a corrente desejada pelo controle, neste caso tem se que usar um inversor PWM em alta freqüência com uma tensão adequada em relação a tensão do motor. Neste caso como podemos impor a corrente pelos reguladores de corrente a equação que descreve a tensão

do motor em relação as suas características é resolvida pelo inversor e portanto pode ser suprimida do modelo matemático do motor.

O fluxo rotórico, de modo semelhante ao acionamento da máquina de corrente continua e mantido no valor nominal em velocidade abaixo da velocidade nominal e trabalha reduzido em velocidade acima da nominal (enfraquecimento de campo).

A diferença de velocidade (erro) é aplicado ao regulador de velocidade que atua sobre o valor de referencia de corrente isq, que é a responsável pelo torque do motor, variando este de modo a zerar o erro de velocidade.

O encoder incremental acoplado ao eixo do motor fornece a referencia da velocidade real.

- ***Controle Vetorial Orientado ao Fluxo Estatórico (sensorless)***

No controle sensorless (sem encoder, ou seja sem medida direta da velocidade) o valor da velocidade necessário para a regulação em malha fechada é estimado a partir dos parâmetros do motor e das variáveis disponíveis como: corrente e tensão do estator.

Com estes valores pode ser calculado o fluxo estatórico através de $\lambda s=\int(Vs-Rs.Is)dt$, desta forma estima-se o fluxo rotórico a partir do fluxo estatórico. Embora isto envolva o calculo das indutâncias do motor, tornando desta forma a orientação de campo sensível a variação deste parâmetro.

Desta forma o controle pelo fluxo estatórico é mais conveniente, resultando num sistema mais robusto. O principio de controle é igual ao do controle com encoder.

- ***Controle Vetorial Orientado ao Fluxo Rotórico (com encoder)***

<u>Princípio da Orientação de campo</u>

Se a posição do fluxo rotórico for conhecida pode se encontrar a direção das correntes no estator. Podemos decompor do vetor de fluxo rotórico as correntes isd e isq que definem o torque como:

$$T_e = K.i_{mr}.i_{sq}$$

Temos para o torque uma relação semelhante ao de uma máquina CC. Onde imr= corrente de magnetização. A corrente de magnetização é controlada pela componente isd que pode ser comparada com a tensão de campo do motor CC.

Neste caso controlando a amplitude do vetor da corrente estatórica e sua fase em relação ao fluxo rotórico é possível controlar o torque do motor de indução semelhante a uma máquina CC. Tendo então o controle do torque, pode ser adicionado uma malha fechada de velocidade desta forma obtendo um acionamento completo.

<u>SELF-COMMISSIONING</u>

O controle vetorial tem uma maior performance no acionamento do motor de indução do que o controle escalar.

Nos diagramas de blocos vemos a existência de vários reguladores PI que precisam ter seus valores de controle adequados para cada acionamento para melhorar a estabilidade e boa

resposta dinâmica. Para isto é preciso estimar algumas variáveis. Neste caso precisa se ter um bom conhecimento dos parâmetros do motor.

Com o sistema self-commissioning o próprio inversor mede os parâmetros do motor. Para o ajuste dos reguladores, desta forma facilitando a colocação em operação.

As medições feitas pelo inversor vetorial são:

- Medição da resistência estatórica;
- Medição da indutância de dispersão total;
- Ajuste dos reguladores de corrente;
- Medição da corrente de magnetização;
- Medição da constante rotórica;
- Medição da constante mecânica.

Operação

<u>Ajuste do regulador de velocidade</u>

Embora o inversor com encoder através do self-commisioning é necessário o ajuste dos parâmetros do regulador de velocidade em função da aplicação.

Para o sistema com controle sensorless também é preciso um ajuste fino, pois o inversor não estima a constante mecânica da carga. Estes ajustes dos parâmetros P e I geram uma melhor estabilidade e resposta dinâmica.

<u>Operação Abaixo de 3Hz</u>

O motor pode operar nesta freqüência desde que por um tempo pequeno caso contrario o inversor perde a orientação.

<u>Precisão Estática de Velocidade</u>

Depende apenas do método de medição e da precisão da referencia de velocidade.

<u>Ajuste Fluxo/Corrente de Magnetização/Enfraquecimento de Campo</u>

Quando o motor trabalha abaixo da rotação nominal com torque constante deve se manter o fluxo do motor no seu valor máximo de modo a manter uma boa relação entre torque e corrente estatórica. Neste caso tem se que analisar a capacidade do inversor em impor as correntes necessárias para que a orientação de campo não fique prejudicada e tem-se como resultado uma oscilação de velocidade e a impossibilidade de atingir a velocidade desejada. Neste ponto tem se que o inversor deva ter uma margem de tensão suficiente para a imposição das correntes mesmo na condição de tensão de rede baixa, para isso pode ser necessário reduzir o ponto de inicio do enfraquecimento de campo

Como vimos, o controle vetorial representa, sem duvida, um avanço tecnológico significativo, aliado as performances dinâmicas de um acionamento CC e as vantagens de um motor CA, porem, em alguns sistemas que utilizam controle vetorial é necessário o uso de tacogerador de pulsos acoplado ao motor para que se tenha uma melhor dinâmica, o que torna o motor especial. Além disso, a função de regeneração é mais complicada, pois requer circuitos adicionais tais como ponte retificadora antiparalela na entrada e hardware adicional para regeneração, em comparação a um acionamento por motor CC e conversor CA/CC.

3.3.3.4 *OBSERVAÇÕES E CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES*

1) Quanto menor a tensão e a freqüência do estator, mais significativa é a queda de tensão no estator, de modo que para baixas freqüências, mantendo-se a proporcionalidade entre a freqüência e a tensão, o fluxo e consequentemente o conjugado da máquina diminui bastante. Para que isto seja evitado, a tensão do estator para baixas freqüências deve ser aumentada, através da compensação IxR, conforme figura a seguir:

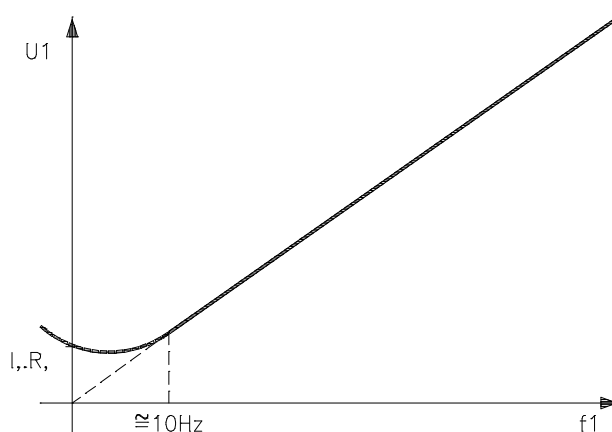



Figura 3.33 - Curva característica U/f com compensação IxR

Para a faixa compreendida entre 0 a aproximadamente 10 Hz, a relação entre U_1 e Φ não é determinada facilmente, pois dependem tanto de f_1 (freqüência estatórica) como de f_2 (freqüência rotórica). Portanto, a elevação da tensão em baixas freqüências depende também da freqüência do escorregamento e consequentemente da carga.

2) Relações U_1/f_1 acima dos valores nominais estão limitadas em função de que para altos valores de tensão ocorre a saturação e o conseqüente enfraquecimento do campo. Combinando as equações já apresentadas e com a consideração de pequenos valores de escorregamento e supondo f_2 proporcional a f_1, podemos dizer que:

- o conjugado máximo decresce com o quadrado da velocidade ($1/n^2$);
- o conjugado nominal decresce hiperbólicamente com a velocidade (1/n), e decresce aproximadamente com o quadrado do fluxo (Φ^2);
- aproximadamente, a velocidade máxima com potência constante é:

$$n_{mx} < \left(\frac{C_{mx}}{C_{nom}} \right) \times n_{nom}$$

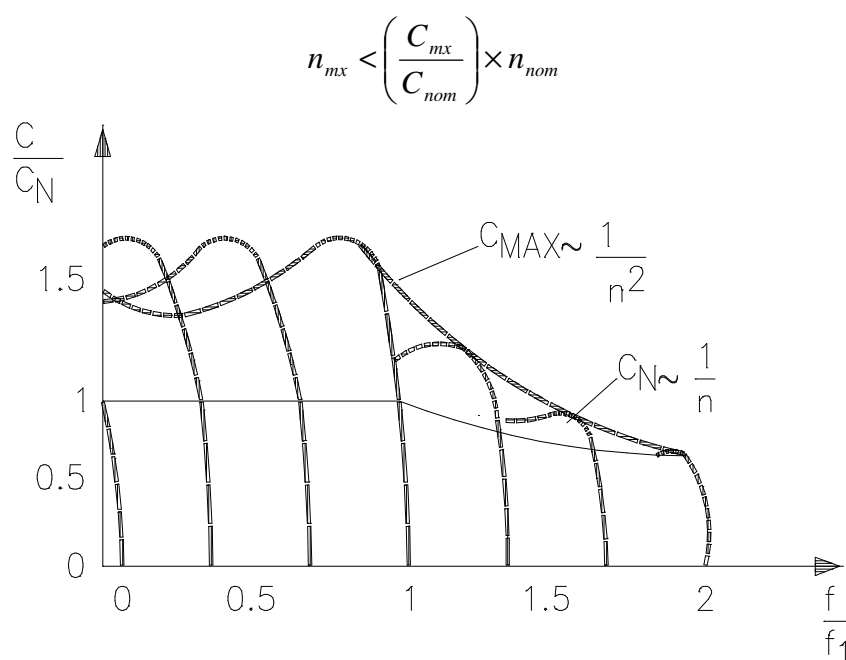



Figura 3.34 - Enfraquecimento de campo para valores de tensão e freqüência acima dos nominais.

3) Em função de que as formas de onda, tanto de tensão como de corrente, produzidas pelos conversores de freqüência não são senoidais, com um alto conteúdo de harmônicos de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem, as perdas nos motores são maiores. Portanto, faz-se necessário uma redução nas características nominais do motor de aproximadamente 10%.

4) O controle de velocidade de máquinas assíncronas, principalmente em aplicações que exigem elevadas dinâmicas do acionamento, é mais difícil do que nas máquinas de corrente contínua. Ao contrário do motor CC, no qual as grandezas que resultam no conjugado motor, ou seja, a corrente de armadura e corrente de campo podem ser controladas, no motor assíncrono apenas a corrente do estator é acessível. A corrente de magnetização e a corrente do rotor podem ser determinadas apenas indiretamente. Entretanto, altas performances de acionamentos CA podem ser também alcançadas quando, por processos de decomposição vetorial, a corrente do estator é dividida em duas componentes, uma componente de fluxo e outra de torque, onde ambas são controladas independentemente, de forma análoga aos acionamentos com motores CC de excitação independente.

3.3.3.5 *CONSTITUIÇÃO BÁSICA DO CONTROLADOR ELETRÔNICO*

Os controladores eletrônicos dos conversores de freqüência na atualidade são constituídos basicamente de controladores lógicos digitais, que executam todas as funções operacionais do conversor, como: geração dos pulsos de disparo dos transistores, monitoração e proteção dos componentes de potência, interpretação dos comandos, implementação das funções

especiais de controle, etc. De uma forma genérica, o controlador pode ser basicamente dividido nas seguintes partes:

- Microcontrolador (CPU);
- Memórias (EPROM - EEPROM - RAM);
- Sistema de entrada e saída de dados.

Cada parte do controlador tem uma função específica, ao qual veremos a seguir.

Microcontrolador

O microcontrolador, ou unidade central de processamento (UCP), é a unidade responsável em coordenar todas as tarefas e executar os cálculos. Ela também pode ser chamada de processador e pode ser dividida em três partes básicas: Unidade Lógica Aritmética (ULA), Unidade de Controle e Rede de Registradores.

A unidade aritmética é a responsável pela execução dos cálculos com os dados. Por exemplo, as operações lógicas básicas (E, OU, etc) entre dois dados ou as operações aritméticas como soma, divisão, subtração, multiplicação, etc.

A unidade de controle é a responsável por gerar os sinais de controle para os sistemas, como leitura ou escrita da memória, de sincronização de interface de comunicação, enfim, todos os sinais de controle necessários para o sistema.

A rede de registradores é constituída por uma série de registradores que são utilizados geralmente para armazenar dados temporariamente, dados que estão sendo manipulados pelo processador, ou registrador utilizado como contador de programa, ou ainda, registrador utilizado como armazenador de endereços, etc.

Com o avanço da microeletrônica, a construção de microprocessadores dedicados (microcontroladores) tornou-se mais generalizada, onde todas as funções que anteriormente eram executadas através da utilização de vários circuitos integrados individuais, foram sendo condensadas em um único circuito integrado (CHIP). Daí então se tornou perceptível a distinção entre microprocessadores, que são circuitos integrados para aplicação genérica e microcontroladores, que são circuitos integrados para aplicações dedicadas.

Memórias (EPROM - EEPROM - RAM)

As memórias em circuito integrado pode ser divididas em dois grupos distintos:

- Memória ROM (Read Only Memory) - Memória apenas de leitura;
- Memória RAM (Random Acess Memory) - Memória de acesso aleatório.

As memórias ROM são designadas como memórias de programa por serem memórias que não podem ser alteradas pelo programa, porém tem a vantagem de não perderem as suas informações mesmo quando é desligada a alimentação.

As memórias ROM são utilizadas para armazenar os programas ou dados que não necessitam ser alterados.

Entre os principais tipos de memórias ROM, podem ser destacados os seguintes:

- ***ROM MÁSCARA*** - São memórias nas quais as informações são gravadas em sua fabricação;
- ***PROM*** (Programmable Read Only Memory) - São memórias que podem ser eletricamente programáveis, porém, após programadas, o seu conteúdo não pode ser mais alterado;
- ***EPROM*** (Erasable Programmable Read Only Memory) - São memórias que podem ser eletricamente programáveis e podem ser apagadas posteriormente, para serem reutilizadas com uma nova programação. Para serem apagadas, estas memórias devem ser expostas à luz ultravioleta;
- ***EEPROM*** (Electrical Erasable Programmable Read Only Memory) - Também são memórias que podem ser eletricamente programáveis e podem ser apagadas posteriormente, para serem reutilizadas com uma nova programação. Estas memórias podem ser apagadas através de sinais elétricos, o que as torna muito mais versáteis onde é necessário programar dados que devem ser alterados continuamente, mas que não podem ser perdidos quando da falta de alimentação. Este tipo de memória é que é utilizada internamente dos controladores dos conversores de freqüência, pois é nela que se armazenam os dados referentes aos parâmetros de operação e características de funcionamento do conversor, dados que são alterados conforme as características da aplicação e que não podem ser perdidos quando da desenergização do conversor.

As memórias RAM são designadas como memórias de dados e são memórias que podem ser lidas ou gravadas pelo programa. As memórias RAM são utilizadas para armazenar temporariamente dados que são alterados no decorrer do programa. As memórias RAM possuem a característica de perder os dados armazenados quando da falta de alimentação, e atualmente, elas já se encontram incorporadas no mesmo circuito integrado do microcontrolador, visando a diminuição de espaço e número de componentes na placa de circuito impresso.

Sistema de entrada e saída de dados

O sistema de entrada e saída de dados é composto de dispositivos responsáveis pela interligação entre o homem e a máquina. São os dispositivos por onde o homem pode introduzir informações na máquina ou por onde a máquina pode enviar informações ao homem. Para os conversores de freqüência, podemos citar os seguintes dispositivos:

- ***INTERFACE HOMEM x MÁQUINA***: é um dispositivo de entrada/saída de dados, onde o operador pode entrar com os valores dos parâmetros de operação do conversor, como: ajuste de velocidade, tempo de aceleração/desaceleração, freqüência máxima e mínima, limitações de corrente, etc. e também pode ter acesso aos dados de operação do conversor, como: velocidade do motor, corrente e tensão fornecida, freqüência aplicada, proteções atuadas, etc.

- ***ENTRADAS E SAÍDAS ANALÓGICAS***: são meios de controlar/monitorar o conversor através de sinais eletrônicos analógicos, isto é, sinais em tensão (0...10 Vcc) ou em corrente (0...20 mA, 4...20 mA) e que permitem basicamente fazer o controle de velocidade (entrada) e leituras de corrente ou velocidade (saída).

- ***ENTRADAS E SAÍDAS DIGITAIS***: são meios de controlar/monitorar o conversor através de sinais discretos (digitais) como chaves Liga/Desliga. Este tipo de controle permite basicamente ter acesso a funções simples como: seleção de sentido de rotação, bloqueio, seleção de velocidades pré-programadas, etc.

- ***INTERFACE DE COMUNICAÇÃO SERIAL***: este meio de comunicação permite que o conversor seja controlado/monitorado a distância através de um computador central, que permite ao mesmo ter acesso aos parâmetros de programação do conversor, da mesma forma como com a Interface HomemxMáquina. Esta comunicação é executada através de pares de fios, podendo ser conectados vários conversores em conjunto a um mesmo computador central como SDCD, CLP, etc, denominando-se de ligação em rede.

Os sistemas de comunicação normalmente utilizados são RS 232 ou RS 485.

3.4 APLICAÇÃO DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

3.4.1 *INTRODUÇÃO*

Afirmar que uma carga mecânica requer uma determinada potência **P**, é a dizer que tal carga necessita de um dado conjugado **C**, a uma dada velocidade de rotação **n**.

Matematicamente existem infinitas combinações de **C** e **n** de modo a resultar no mesmo valor de **P**; fisicamente, contudo, uma específica carga mecânica associa-se a um único par (**C**,**n**) e respectivamente a uma potência **P**, através da relação:

$$P = \frac{C \times n}{k}$$

Onde: P = Potência;
C = Conjugado;
n = Rotação;
k = Constante relacionada com unidades utilizadas.

A curva C em função de n é uma característica fundamental para o processo de seleção do motor adequado ao acionamento, sendo que o conjugado resistente depende da carga, mas todos podem ser representados pela expressão:

$$C_c = C_o + k_c \times n^x$$

Onde: C_c = Conjugado resistente da carga;
C_o = Conjugado da carga para rotação zero;
k_c = Constante que depende da carga;
x = Parâmetro que depende da carga, podendo assumir os valores -1, 0, 1, 2.

De acordo com a equação, percebe-se que o conjugado da carga varia com a rotação n. Esta variação depende do parâmetro **"x"**, e em função deste as cargas podem ser classificadas em quatro grupos:

- Cargas com conjugado resistente CONSTANTE;
- Cargas com conjugado resistente LINEAR;
- Cargas com conjugado resistente QUADRÁTICO;
- Cargas com conjugado resistente HIPERBÓLICO.

3.4.2 *CRITÉRIOS DE APLICAÇÃO*

3.4.2.1 *OPERAÇÃO ABAIXO DA ROTAÇÃO NOMINAL*

Considerando-se que as perdas no cobre são resultado da corrente do motor, então a perda de potência será proporcional à carga. Dessa forma, se o motor gira mais lento, com a mesma corrente nominal (determinada pela carga) gerando a mesma perda de potência que ocorre em velocidades mais elevadas, o motor se sobreaquece, pois há um menor fluxo de ar de

refrigeração disponível quando o ventilador do motor se movimenta em velocidades menores (motores autoventilados). Quando o motor é utilizado em aplicações para controle de ventiladores ou bombas centrífugas, a carga normalmente diminui, conforme a velocidade se reduz, dessa forma o sobreaquecimento deixa de existir. Em aplicações onde o motor deve desenvolver pleno torque (100% da corrente) em baixa velocidade, o sobredimensionamento ou utilização de motores com um fator de serviço mais elevado se torna necessário.

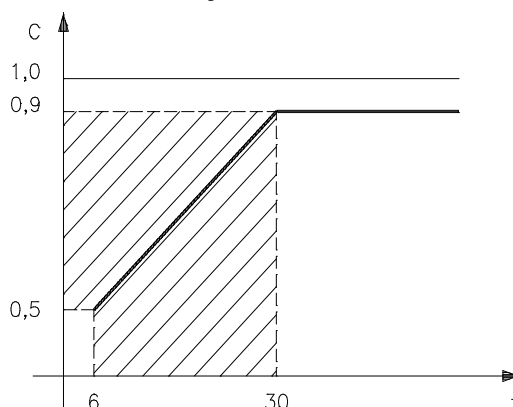



Figura 3.35 - Diminuição de torque devido a redução de refrigeração do motor.

Geralmente, em aplicações que possuam carga com conjugado constante e variação de velocidade de 0 a 50% da rotação nominal, utiliza-se o fator K de redução de potência, da figura anterior, ou se quisermos, poderemos utilizar o fator de serviço e/ou o aumento da classe de isolamento para manter o torque constante.

OBSERVAÇÃO:

Chama-se fator de serviço (FS) o fator que aplicado à potência nominal, indica a carga permissível que pode ser aplicada continuamente no motor, sob condições especificadas. Note que se trata de uma capacidade de sobrecarga contínua, ou seja, uma reserva de potência que dá ao motor uma capacidade de ainda suportar o funcionamento em condições desfavoráveis. O fator de serviço não deve ser confundido com a capacidade de sobrecarga momentânea, durante alguns segundos. O fator de serviço FS = 1,0, significa que o motor não foi projetado para funcionar continuamente acima da sua potência nominal. Isto, entretanto, não muda a sua capacidade para sobrecargas momentâneas.

3.4.2.1.1 *MOTORES AUTOVENTILADOS*

Para a operação com motores autoventilados padrões, é aconselhável a utilização de operação na faixa entre 50% a 100% da rotação nominal, faixa em que o ventilador acoplado ao próprio eixo do motor ainda possui eficiência na refrigeração. Para rotações abaixo de 50%, em caso de cargas com conjugado constante, é necessário o sobredimensionamento da carcaça do motor, ou através do simples aumento da potência nominal do motor, ou então através da fabricação de um motor especial com a carcaça sobredimensionada, a fim de prover a devida refrigeração do motor.

Para o cálculo da carcaça a ser utilizada, deve-se levar em consideração o torque necessário pela carga a ser acionada e a faixa de variação de velocidade. Definindo-se a velocidade mínima de operação, utiliza-se o gráfico abaixo:

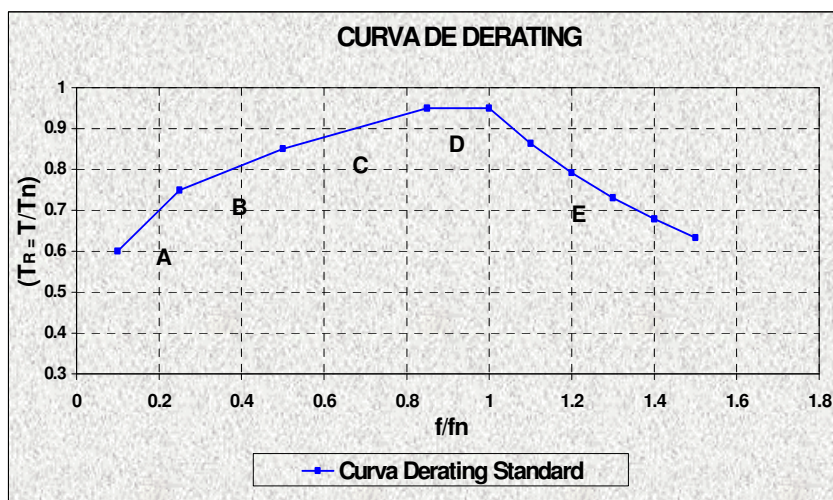



Figura 3.36 - Característica de conjugado disponível x rotação em motores autoventilados

TRECHO	CURVA DERATING	
	LIMITES	DERATING
A	**0 ≤ f/fn <0.25**	T_R = (f/fn) + 0.50
B	**0.25 ≤ f/fn <0.50**	T_R = 0.4(f/fn) + 0.65
C	**0.50 ≤ f/fn <0.83**	T_R = 0.3(f/fn) + 0.70
D	**0.83≤ f/fn <1.0**	T_R = 0.95
E	**f/fn > 1.0**	T_R = 0.95 / (f/fn)

Pelo valor da freqüência mínima (rotação mínima) necessária à aplicação, utilizando o gráfico, defini-se o valor do conjugado máximo disponível (em p.u.) no motor sem ocorrer sobreaquecimento, utilizando a potência necessária ao acionamento.

Com este valor, defini-se então o novo conjugado do motor (sobredimensionado) que deveria ser utilizado sem sobreaquecimento utilizando o conjugado necessário para acionar a carga, por:

$$C_{(sobredimensionado)} = \frac{C_{(carga)}}{K}$$

Com o conjugado sobredimensionado obtido, define-se através de uma tabela de características de motores padrões, qual o motor que possui este conjugado. Este motor portanto terá a carcaça que permitirá a utilização na faixa de rotações necessária sem o problema de sobreaquecimento, fornecendo o conjugado necessário para acionar a carga.

Pode-se então utilizar este motor diretamente, que estará sobredimensionado em carcaça e também em potência, ou então utilizar um motor que possua esta carcaça sobredimensionada, mas com a potência ajustada ao acionamento, através da bobinagem de enrolamentos em carcaça maior (motor especial).

3.4.2.1.2 *MOTORES COM VENTILAÇÃO INDEPENDENTE*

Com a utilização de motores com ventilação independente, não existirá mais o problema de sobreaquecimento do motor por redução de refrigeração, podendo o mesmo ser dimensionado com a carcaça normal e potência necessária ao acionamento.

Para motores com ventilação independente, o ventilador que era acoplado ao próprio eixo do motor agora é acoplado à um outro motor independente, que geralmente é acoplado ao motor principal por intermédio de uma flange defletora especial (reforçada) que permite o suporte mecânico do motor da ventilação.

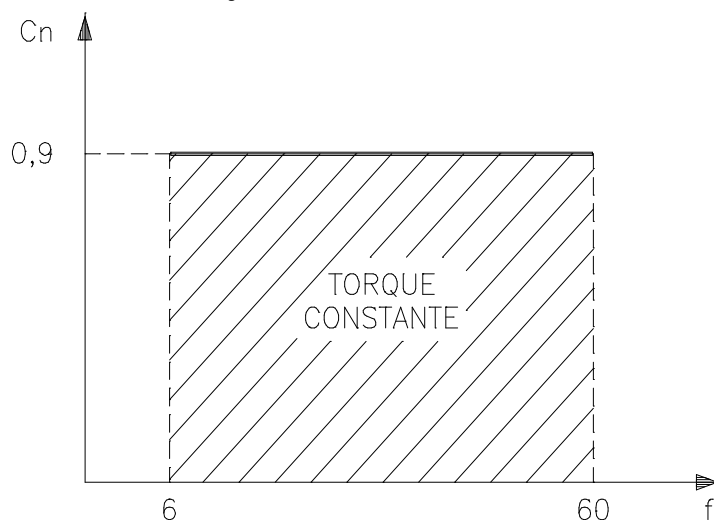



Figura 3.37 - Característica de conjugado disponível x rotação em motores com ventilação independente.

3.4.2.2 *OPERAÇÃO ACIMA DA ROTAÇÃO NOMINAL*

Um motor padrão para operar em rede de freqüência de 50 ou 60 Hz pode girar a freqüências mais altas quando alimentado por um conversor de freqüência.

A velocidade máxima depende dos limites de isolação para a tensão do motor e seu balanceamento mecânico.

Neste caso, como o motor funcionará com enfraquecimento de campo, a máxima velocidade estará limitada pelo torque disponível do motor e pela máxima velocidade periférica das partes girantes do motor (ventilador, rotor, mancais).

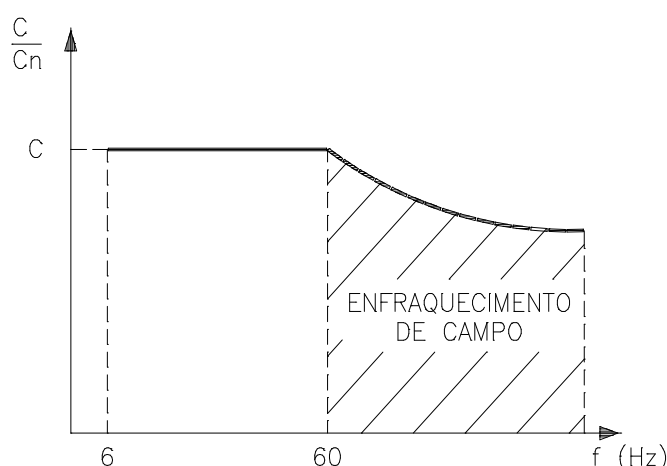



Figura 3.38 - Diminuição de torque devido ao aumento de velocidade

CASOS ESPECIAIS:

A potência admissível de um conversor de freqüência é determinada levando-se em consideração, principalmente, dois fatores:

- Altitude em que o conversor será instalado;
- Temperatura do meio refrigerante;

Conforme a NBR-7094, as condições usuais de serviço, são:

a) Altitude não superior a 1000 m acima do nível do mar;
b) Meio refrigerante (ar ambiente) com temperatura não superior a 40ºC;

Nos casos em que o conversor deva trabalhar com temperatura do ar de refrigeração na potência nominal, maior do que 40ºC e/ou em altitude maior do que 1000m acima do nível do mar, deve-se considerar os seguintes fatores de redução:

3.4.2.3 *OPERAÇÃO EM AMBIENTES COM TEMPERATURA ELEVADA*

A redução da potência (corrente) nominal do conversor de freqüência, devido à elevação da temperatura ambiente, acima de 40ºC e limitada a 50ºC, é dada pela relação e gráfico a seguir:

Fator de redução = 2%/ºC

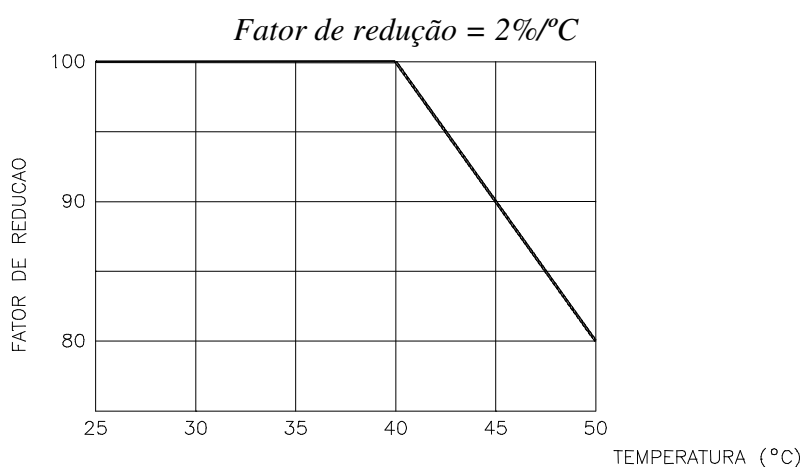



Figura 3.38 - Curva de redução de potência nominal
em função do aumento da temperatura

3.4.2.4 *OPERAÇÃO EM REGIÕES DE ALTITUDE ELEVADA*

Conversores funcionando em altitudes acima de 1000 m , apresentam problemas de aquecimento causado pela rarefação do ar e, consequentemente, diminuição do seu poder de arrefecimento. A insuficiente troca de calor entre o conversor e o ar circundante, leva a exigência de redução de perdas, o que significa, também redução de potência. Os conversores tem aquecimento diretamente proporcional às perdas e estas variam, aproximadamente, numa razão quadrática com a potência. Segundo a norma NBR-7094, os limites de elevação de temperatura deverão ser reduzidos de 1% para cada 100 m de altitude acima de 1000 m.

A redução da potência (corrente) nominal do conversor de freqüência, devido à elevação da altitude acima de 1000 m e limitada a 4000 m, é dada pela relação e gráfico a seguir:

Fator de redução = 1%/100m

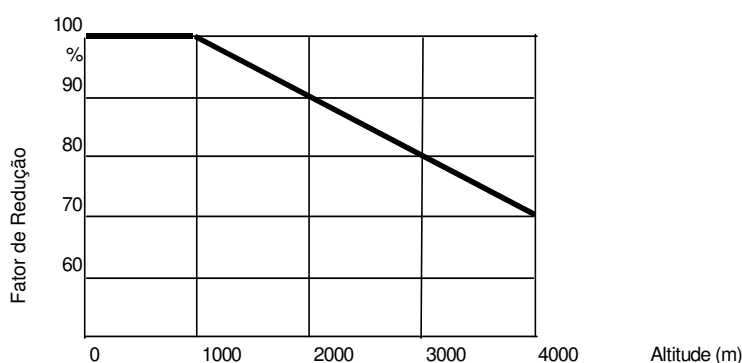



Figura 3.40 - Curva de redução de potência nominal
em função do aumento da altitude

3.4.2.5 *CONSIDERAÇÕES SOBRE ACIONAMENTOS MULTIMOTORES*

Os conversores de freqüência podem alimentar múltiplos motores, controlando-os na mesma proporção para dar partida/parada em uma máquina, tal como um sistema transportador.

3.4.2.5.1 *SISTEMA DE ACIONAMENTO MULTICONVERSORES*

Para este acionamento considera-se a utilização de um conversor para cada motor, e o sincronismo entre os motores pode ser obtido utilizando-se uma lógica (equipamentos) auxiliar para permitir que se tenha a aceleração/desaceleração do sistema em conjunto para que não aconteçam sobrecargas individuais em alguns motores.

Um sistema possível de se interligar os conversores é demonstrado na figura a seguir, em uma configuração designada "Mestre-Escravo", onde a referência principal de velocidade é colocada no conversor "Mestre", e a partir deste conversor é enviado um sinal de referência de velocidade para o conversor seguinte, e assim sucessivamente para os demais conversores "Escravos" em cascata.

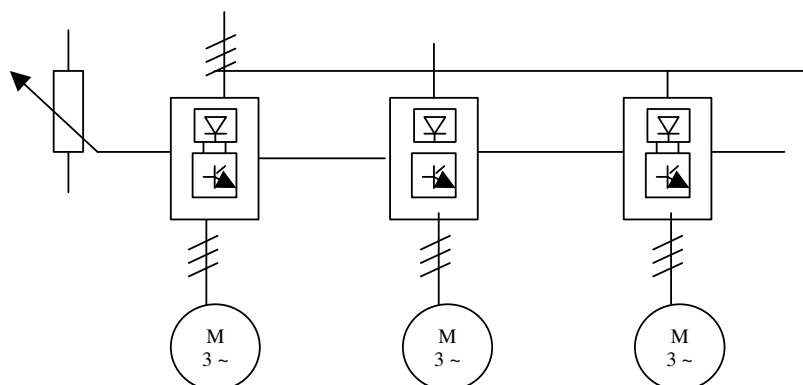



Figura 3.41 - Ligação de conversores em sincronismo "Mestre-Escravo"

Como características deste tipo de acionamento podemos citar:

a) A proteção de cada motor é feita individualmente e diretamente pelo respectivo conversor e fusíveis ultra- rápidos;
b) A potência de cada conversor é a própria potência do motor acionado;
c) Pode haver o desligamento e religamento de cada motor individualmente, caso não seja necessário o sincronismo entre todos os motores;

3.4.2.5.2 *SISTEMA DE ACIONAMENTO MONOICONVERSOR*

Para este acionamento considera-se a utilização de um conversor para vários motores, e o sincronismo entre os motores é obtido pela simples injeção da mesma freqüência de alimentação para todos os motores. A figura a seguir demonstra a ligação destes motores:

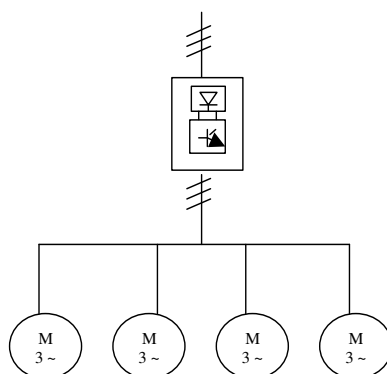



Figura 3.42 - Ligação de conversor a vários motores

Como características deste tipo de acionamento podemos citar:

a) A proteção de cada motor é feita através de um relé térmico adicional, individualmente para cada motor na saída do conversor;

b) A potência do conversor é igual a somatória de todas as potências dos motores acionados;

c) Não pode haver o desligamento e religamento de cada motor individualmente, pois isto seria encarado como a condição de uma partida direta do motor, ocasionando um pico de corrente no religamento que causaria o bloqueio do conversor por sobrecorrente. No caso de desligamento de um motor, é necessário o desligamento de toda a máquina para a posterior partida conjunta pela rampa de aceleração.

3.4.2.6 *CONSIDERAÇÕES SOBRE ACIONAMENTO DE MOTOR MONOFÁSICO*

O acionamento de motores monofásicos não pode ser feito através da utilização de conversores de freqüência, devido aos princípios físicos de funcionamento (partida) do motor. Em motores monofásicos, a partida é efetuada através da utilização de um enrolamento estatórico auxiliar e de um capacitor de partida, que de uma forma genérica, causam uma deformação no campo girante do motor, que por sua vez produz torque. Após o processo de partida, quando o motor atinge uma determinada velocidade, um contato auxiliar (centrífugo) desconecta o enrolamento auxiliar e o capacitor da rede, operando o motor apenas com o enrolamento principal conectado à rede.

Caso fosse utilizado um conversor de freqüência, o mesmo teria de ter sua saída monofásica e haveria a necessidade da utilização do enrolamento auxiliar e do capacitor para a partida (criação de campo girante). Como a tensão de saída do conversor possui uma forma de onda pulsante (PWM), a utilização do capacitor se torna proibitiva, pois os pulsos de tensão causariam a destruição do capacitor.

3.4.3 *EFEITO DOS HARMÔNICOS NA REDE*

3.4.3.1 *FATOR DE POTÊNCIA E FATOR DE DESLOCAMENTO*

Quando se trabalha com retificadores a diodo e filtro capacitivo, deve-se ter um cuidado especial para não confundir o fator de potência com o fator de deslocamento (cos α). O fator de potência é dado por:

$$FP = \frac{P}{V_{ief} \times I_{ief}}$$

Onde: FP = Fator de potência
P = Potência média de entrada do circuito
V_{ief} = Valor eficaz da tensão senoidal de entrada
I_{ief} = Valor eficaz da corrente total de entrada.

Devido a corrente de entrada possuir harmônicas, temos:

$$Ii(t) = Ii(t) + \sum Ii_{(n)}(t)$$

Sendo: Ii(t) = Corrente total de entrada

$\Sigma Ii_{(n)}(t)$ = Somatório das harmônicas de corrente
n = Ordem da harmônica de corrente.

$$Ii_{ef}^{\ 2} = Ii_{(1)ef}^{\ \ 2} + \sum Ii_{(n)ef}^{\ \ 2}$$

Como a transferência de potência ativa ocorre para harmônicas de tensão e corrente da mesma ordem, a potência média de entrada será definida por:

$$P = V_{ief} \times Ii_{(1)ef} \times cos\,\varphi$$

Onde:

$Ii_{(1)ef}$ = Valor eficaz da componente fundamental da corrente de carga
α = Ângulo de deslocamento entre a tensão e a componente fundamental da corrente de entrada.

Portanto, substituindo (4) e (3) em (1), tem-se:

$$FP = \frac{Ii_{(1)ef}}{\sqrt{Ii_{(1)ef}^{2} + \Sigma Ii_{(n)ef}^{2}}} \cdot cos\varphi$$

ou:

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Sigma Ii_{(n)ef}^{2}}{Ii_{(1)ef}^{2}}}} . cos\,\varphi$$

Definindo-se taxa de distorção harmônica (TDH):

$$TDH = \frac{\sqrt{\Sigma\, Ii_{(n)ef}^{\ 2}}}{Ii_{\ (1)ef}}$$

Obtém-se:

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + TDH^{2}}} . cosvarphi$$

Dessa forma, para se ter fator de potência unitário, é necessário:

- Deslocamento nulo entre tensão de entrada e a fundamental da corrente de entrada ($cos\varphi = 1$);
- Ausência de harmônicas de corrente.

Portanto, se a forma de onda da corrente de entrada apresentar harmônicas (corrente não senoidal), o fator de potência deixará de ser unitário, mesmo que o fator de deslocamento (cos _) seja unitário.

Na figura 3.38 é possível observar que o fator de potência será igual ao fator de deslocamento para correntes de entrada puramente senoidais.

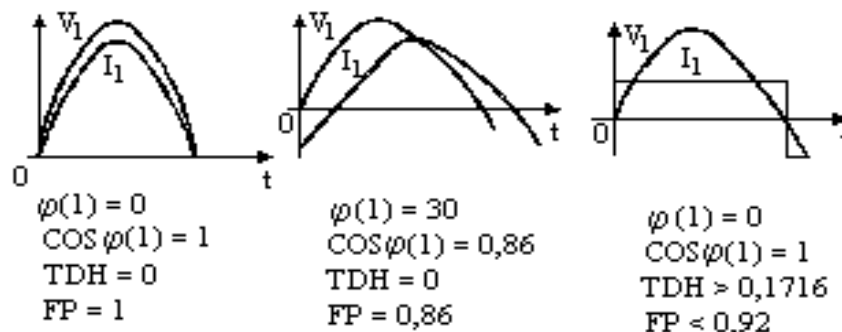



Figura 3.43 - Exemplos que ilustram as diferenças entre fator de deslocamento e fator de potência.

3.4.3.2 *UTILIZAÇÃO DE REATÂNCIA DE REDE*

A utilização de reatâncias trifásicas entre a rede e a entrada do conversor possibilita o efeito de filtragem das correntes de entrada reduzindo as harmônicas nestas. Como resultado tem-se:

- redução da corrente RMS de entrada;
- aumento do fator de potência;
- aumento da vida útil dos capacitores do circuito intermediário;
- diminuição da distorção harmônica na rede de alimentação.

A rede, ou transformador de alimentação, deverá apresentar uma capacidade mínima de 1,5 vezes a potência em kVA do conversor, para que este opere corretamente, sem problemas de aquecimento devido a existência de correntes harmônicas.

Os critérios para utilização ou não destas são os seguintes:

I) UTILIZAR QUANDO:

- conversor com corrente < 50A, potência da rede (ou transformador) de alimentação > 500 kVA e queda na cablagem de alimentação do conversor < 2% na corrente nominal de entrada;
- conversores com corrente > ou = 50A alimentados direto da rede;
- vários conversores em um painel alimentados pela mesma rede;
- desejado fator de potência na entrada > 0,9 na condição nominal.

II) NÃO UTILIZAR QUANDO:

- conversor com corrente < 50A, potência da rede (ou transformador) de alimentação < ou = 500 kVA;
- - conversor com corrente < 50A, potência da rede (ou transformador) de alimentação >500 kVA e queda na cablagem de alimentação do conversor > 2% na corrente nominal de entrada;
- - forem utilizados transformadores, ou autotransformadores, para alimentação individual de conversores (potência menor que 3 vezes a potência em kVA do conversor). A própria reatância de dispersão de fluxo do transformador associado a resistência ôhmica dos fios fazem o papel da reatância de rede, sendo esta portanto, dispensável.

Deve-se dimensionar estas reatâncias para uma queda de tensão de 2% a 4% da tensão nominal de entrada quando circular a corrente nominal do conversor. Isto se faz necessário pelo fato de que não se deve ter uma distorção na forma de onda da tensão de rede maior do que 4%.

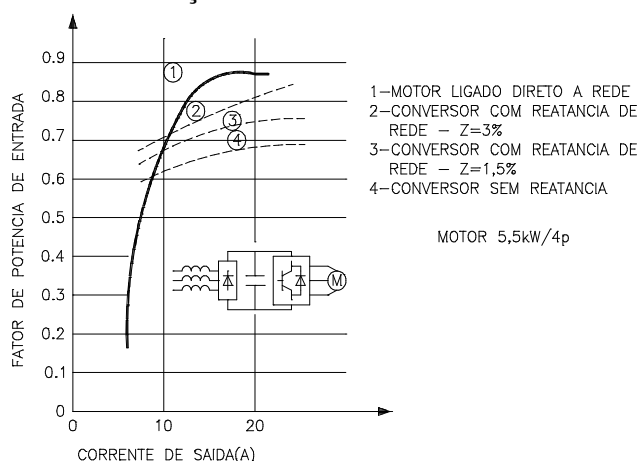



Figura 3.44 - Comparação entre as componentes harmônicas incluídas na corrente quando o conversor é acionado para diferentes capacidades, com e sem reatância de rede.

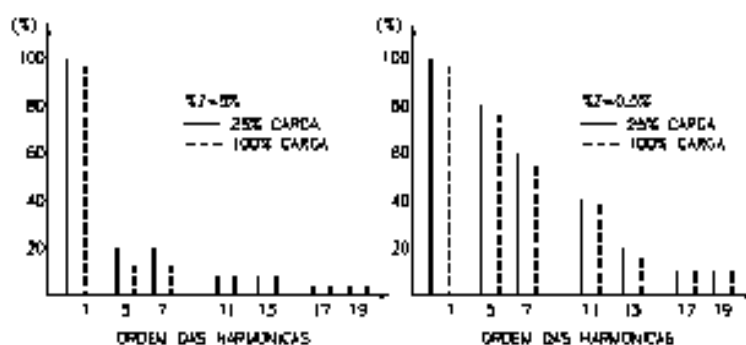



Figura 3.45 - Comparação entre as componentes harmônicas incluídas na corrente quando o conversor é acionado para diferentes condições de carga e diferentes valores de impedância da reatância

3.4.3.3 *UTILIZAÇÃO DE FILTRO DE RÁDIO FREQÜENCIA*

Os conversores de freqüência transmitem fortes ondas eletromagnéticas de alta freqüência, que podem interferir em outros equipamentos eletrônicos. Os seguintes cuidados reduzem esta interferência:

- instalação do conversor dentro de um painel metálico (aterrado);
- uso de cabos blindados para conexões do motor;
- aterramento de boa qualidade (baixa resistência);
- uso de filtros supressores na alimentação do conversor.

O uso de filtros supressores se faz necessário pelo fato de que na corrente pulsante que circula entre o conversor e a rede existem além das harmônicas de baixa ordem (harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem basicamente), harmônicas de ordem superior que ultrapassam a freqüência de 100 kHz (rádio freqüência). A reatância de rede que está instalada na entrada do conversor é utilizada para reduzir principalmente as harmônicas de corrente de baixa ordem, sendo que esta não tem efeito algum para as harmônicas de alta freqüência.

Para estas freqüências que não podem ser atenuadas pela reatância de rede, são utilizados o que se define por FILTROS DE LINHA. Estes filtros de linha são circuitos formados por capacitores e indutores associados, que podem efetuar a atenuação de determinadas freqüências críticas definidas a princípio. Estas freqüências críticas podem causar interferência eletromagnética em equipamentos sensíveis, tais como equipamentos de telecomunicações, sistemas digitais de computação, sistemas de transmissão de dados, etc.

3.4.3.4 *CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA*

Cuidados para a instalação de bancos de capacitores na presença de harmônicos

Um grande problema decorrente da necessidade de melhoria de fator de potência dos consumidores refere-se ao fato de que a aplicação conjunta de bancos de capacitores com os diversos tipos de cargas presentes nos sistema industriais, principalmente com conversores estáticos (CA/CC e CA/CA), requer uma análise particular sobre alguns cuidados especiais que devem ser tomados pelo consumidor. Estes cuidados geralmente levam a investimentos adicionais, como a aquisição de capacitores com tensões nominais mais elevadas do que o necessário, a instalação de reatores de dessintonia ou ainda, composição de filtros de harmônicos, quando os estudos indicam a possibilidade de condições de ressonância harmônica.

Os conversores estáticos de potência (CA/CA ou CA/CC) são, na atualidade, as principais fontes de correntes harmônicas. São em geral de média potência, da ordem de quilowatts, e seu número tende a crescer rapidamente, principalmente para controle de motores de corrente alternada.

Efeitos dos harmônicos sobre capacitores

Em muitos casos, os níveis de harmônicos por si só não apresentam maiores problemas. O problema porém pode agravar-se, existindo a possibilidade de uma amplificação de corrente, pela ressonância entre os capacitores de potência e a indutância do sistema. Isto resultará em

sobretensões e na circulação de correntes proibitivas para os capacitores. Haverá um aumento das perdas e conseqüente sobreaquecimento, levando muitas vezes a destruição do capacitor.

Deve-se ressaltar a dependência dos capacitores em relação à tensão de pico resultante (harmônicos inclusos) e ao problema de efeito corona (descargas eletrostáticas pontuais internas ao capacitor), podendo a sua vida útil variar de acordo com a expressão $(1/s.t)^{7,5}$, onde **s** é a sobretensão e **t** é a sobretemperatura (ambos em **"p.u."** do valor nominal). Como a tensão é medida em valor eficaz, o pico de tensão que contém harmônicos é geralmente maior que o da mesma tensão que não os contém. Assim, o dielétrico fica sujeito a um campo maior, o que pode romper o dielétrico e destruir o capacitor.

Sobretensões decorrentes de harmônicos

O processo mais seguro possível para se avaliar a influência de harmônicos em bancos de capacitores consiste em se fazer uma análise harmônica efetiva, comparando as medições de correntes e tensões harmônicas ao longo do sistema com os estudos do alcance das harmônicas no mesmo.

De forma geral, nas condições normais de operação, seria suficiente especificar os bancos de capacitores com uma tensão nominal um pouco acima da tensão de operação do sistema. No entanto, deve ser analisado o fenômeno de amplificação harmônica pelo sistema de ressonância. As correntes harmônicas amplificadas podem causar a queima dos fusíveis, aquecimento e danificação dos capacitores. A existência da ressonância pode ser confirmada pela confrontação das medições de campo com resposta em freqüência do sistema, isto é, gráficos de impedância própria da barra em função da freqüência (na ressonância paralela, a impedância aparece como um pico).

Solução para o problema de ressonância

Para resolver o problema de ressonância, a solução mais utilizada é a instalação de reatores em série com o banco de capacitores (filtro LC), de forma a deslocar a freqüência para uma harmônica que não cause preocupação na amplificação das correntes.

Deve-se ressaltar que embora os reatores sejam necessários para se evitar o efeito de amplificação de harmônicas, sempre que uma indutância é colocada em série com um capacitor, a tensão nos terminais desse último diminui na freqüência fundamental, assim como pode aumentar para freqüências diferentes da fundamental.

Como exemplo, se a dessintonização é levada para o quarto harmônico, será encontrada uma sobretensão de 6,7% além daquela reserva de 10% permissível e já esgotada pelas variações da rede e desequilíbrio de bancos, podendo acarretar com isso uma sobretensão excessiva no capacitor, causando em alguns casos a sua destruição (rompimento do dielétrico).

Os reatores de dessintonia por si só resolvem os problemas de ressonância. No entanto, quando a redução do conteúdo harmônico da instalação, principalmente na interface com a concessionária, é uma necessidade, filtros de harmônicos devem ser previstos, utilizando-se os bancos de capacitores para a composição dos mesmos.

3.5 APLICAÇÕES TÍPICAS

3.5.1 *CONSIDERAÇÕES GERAIS*

Para a utilização de motores elétricos de indução para o acionamento das mais variadas cargas, devem ser levadas em consideração as características da carga acionada conforme descrito no item anterior, tanto para acionamentos com o motor operando com velocidade fixa como também para com velocidade variável, pois em função das características de partida, regime contínuo ou transitório, é que se pode fazer o correto dimensionamento do motor.

Para as aplicações aqui ilustradas, levamos em consideração apenas o acionamento da carga através de motores de indução com conversores de freqüência, determinando suas vantagens e limitações.

3.5.2 *BOMBAS*

Levando em consideração o acionamento de bombas de vários tipos, podemos fazer a separação destas entre dois grupos básicos pela sua característica de conjugado resistente, que são:

3.5.2.1 *BOMBAS DINÂMICAS OU TURBOBOMBAS*

Esta família de bombas (principalmente as BOMBAS CENTRÍFUGAS) possuem como característica ter o conjugado de forma quadrática, isto é, o seu conjugado resistente varia com o quadrado da rotação aplicada. Por exemplo, caso seja duplicada a rotação da bomba para se aumentar a vazão/pressão do sistema hidráulico, consequentemente deverá ser fornecido um conjugado quatro vezes maior para tal.

Caso se deseje fazer controle de vazão/pressão através da variação da velocidade do motor, deve-se levar em consideração os seguintes itens com relação a faixa de variação de velocidade.

Para rotações acima da nominal, deve-se utilizar apenas alguma margem de potência que o motor possa ter, sem que, entretanto, seja ultrapassada a sua potência nominal, para que não entre em condição de sobrecarga e acarrete em diminuição de sua vida útil.

Para faixas de rotações entre rotação nula até a rotação nominal, não existem problemas com relação a sua operação, uma vez que, com a diminuição da rotação da bomba, haverá também uma diminuição do conjugado resistente da carga (de forma quadrática), diminuindo-se consequentemente a corrente aplicada ao motor, não havendo portanto problemas de sobreaquecimento por redução de ventilação nem de sobrecarga no motor.

Este controle de vazão, através da variação de velocidade de bombas centrífugas, possibilita uma grande economia de energia, uma vez que em outros casos, o controle de vazão/pressão de sistemas hidráulicos é feito através de dispositivos limitadores (válvulas, recirculação, etc.), onde o motor que aciona a bomba opera sempre em condição de carga nominal, absorvendo potência nominal da rede.

Em sistemas de controle de vazão/pressão utilizando conversores de freqüência, a potência absorvida da rede é apenas a necessária à condição de operação do sistema (função da carga).

3.5.2.2 *BOMBA DE DESLOCAMENTO POSITIVO OU VOLUMÉTRICAS*

Esta família de bombas possui como característica ter o conjugado de forma constante para qualquer rotação, isto é, o seu conjugado resistente não varia com a rotação. Nesta família se enquadram as BOMBAS A PISTÃO,BOMBAS HELICOIDAIS e as BOMBAS DE ENGRENAGENS.

Caso seja necessário fazer controle de vazão/pressão através da variação da velocidade do motor, deve-se levar em consideração que o motor não poderá operar acima da sua rotação nominal, pois isto significa operar em condição de sobrecarga.

Para condições onde se necessita a operação com rotações abaixo da metade de sua rotação nominal (30 Hz), deverá ser considerado o problema de sobreaquecimento por redução de ventilação para motores convencionais. Problema este que pode ser contornado através do sobredimensionamento da carcaça do motor ou a utilização de ventilação forçada.

3.5.3 *VENTILADORES*

Esta aplicação possui como característica ter o conjugado de forma quadrática, isto é, o seu conjugado resistente varia com o quadrado da rotação aplicada, da mesma forma que foi considerado para as bombas centrífugas.

Para a utilização de acionamento por conversores de freqüência para o controle de pressão/vazão, deve-se levar em consideração as mesmas características das bombas centrífugas, apenas tomando-se o cuidado de observar que certos ventiladores possuem inércias elevadas e que devem serem levadas em consideração para determinar o sistema de partida e tempos de aceleração.

3.5.4 *SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO*

Para sistemas de refrigeração e ar condicionado, os conversores de freqüência são utilizados basicamente nos motores de acionamento das bombas e ventiladores do sistema.

A vantagem em se utilizar este equipamento está no fato de que a automação de grandes sistemas (por ex: Shopping Centers, prédios comerciais, pavilhões de exposições, etc.) se torna bem mais versátil e com possibilidade de racionalização do consumo de energia com respectiva economia.

Com a utilização de conversores de freqüência, não é necessária a utilização de válvulas de controle de fluxo nas bombas ou dampers nos ventiladores/exaustores, possibilitando um controle automático por meio de um controlador central de temperatura, diminuindo-se os gastos com a utilização destes equipamentos e também a diminuição de manutenção das instalações.

3.5.5 *TORNO DE SUPERFÍCIE / LAMINADOR DESFOLHADOR*

Esta aplicação tem como característica possuir o conjugado do tipo que varia inversamente com a rotação (hiperbólico), pois no processo deve ser obedecida a condição de que a velocidade tangencial da peça ou cilindro seja sempre constante, isto é, a velocidade

superficial entre a peça e a ferramenta de corte (BIT) tem de ser constante. Esta velocidade é definida por:

$$V_t = \omega \times r$$

Como:

$$\omega = 2.\pi.n$$

Então:

$$V_t = \pi.n.D \quad \rightarrow \quad V_t = 2\pi.n.r$$

Onde:

V_t = Velocidade tangencial [m/s];
n = Rotação [rps];
r = Raio [m];
D = Diâmetro [m];
ω = Velocidade angular [rad/s].

Nota-se então que, na medida em que o raio (ou diâmetro) da peça diminui, é necessário que a sua rotação aumente para que a velocidade tangencial (ou de superfície) permaneça constante.

Sendo que a força de corte também é constante, o conjugado resistente oferecido pela carga é definido por:

$$C_c = F_c \times r$$

Onde:

C_c = Conjugado da carga;
F_c = Força de corte;
r = Raio.

Dessa forma, na medida em que o raio (ou diâmetro) da peça diminui, o conjugado resistente também diminui. Destas duas considerações tem-se então que para peças de pequeno diâmetro a sua rotação deve ser alta e o conjugado resistente é baixo, e que para peças de grande diâmetro a rotação deve ser baixa e o seu conjugado resistente é alto.

Para o acionamento deste tipo de carga com motor de indução e conversor de freqüência, pode-se utilizar a faixa de rotação entre zero até a rotação nominal, levando-se em consideração o problema de sobreaquecimento do motor em baixas rotações.

Outra forma de se poder fazer o acionamento é utilizando o motor operando acima de sua rotação nominal, entrando em sua região de enfraquecimento de campo, onde a curva de conjugado resistente da carga e o conjugado motor se assemelham, não havendo problemas de sobrecarga no motor e também não havendo problemas de sobreaquecimento por redução de ventilação.

3.5.6 *SISTEMAS DE TRANSPORTE*

Fazem parte desta família de aplicação as ESTEIRAS, CORREIAS, ROSCAS, CORRENTES, MESAS TRANSPORTADORAS, NÓRIAS, MONOVIAS, etc. Estas aplicações podem ser agrupadas, pois possuem as mesmas características quanto ao seu acionamento, tendo o conjugado resistente constante para toda a faixa de velocidade. Deverá ser tomado cuidado especial para condições onde seja necessária a operação com rotações abaixo da metade da

rotação nominal do motor acionado, onde deverá ser considerado o problema de sobreaquecimento por redução de ventilação para motores convencionais. Problema este que pode ser contornado através do sobredimensionamento da carcaça do motor ou a utilização de ventilação forçada.

Outro item que merece atenção é com relação a condição de partida do sistema, pois pode haver a possibilidade de se partir o sistema de transporte a vazio (conjugado resistente reduzido) ou carregado (conjugado resistente elevado). Para esta última condição, deve-se levar em consideração a sobrecarga inicial do sistema, que por sua vez levará a um sobredimensionamento da corrente nominal do conversor de freqüência, proporcional a sobrecarga exigida pelo sistema.

IMPORTANTE

Para sistemas de transportes inclinados em elevação, deve se ter especial atenção na partida do mesmo, pois surge a condição de sobrecarga do motor, cuja a intensidade está diretamente relacionada com o grau de inclinação do mesmo.

Quando o sistema de transporte apresenta inclinação em declive, pode ser necessária a utilização de frenagem do motor, que poderá ser efetuada por resistores auxiliares (frenagem reostática) ou através de sistemas regenerativos. A não utilização desta frenagem poderá acarretar em sobrecarga no conversor e conseqüente desligamento.

Em ambos os sistemas deve-se utilizar motores com freio mecânico de estacionamento para que não haja movimentação do sistema quando da parada do motor, seja ela por parada normal, como também por parada acidental (queda de rede).

3.5.7 *EXTRUSORAS*

Estas máquinas tem como característica possuírem o conjugado resistente do tipo constante para qualquer velocidade. Deve-se novamente ter cuidado especial para condições onde seja necessária a operação com rotações abaixo da metade da rotação nominal do motor, onde deverá ser considerado o problema de sobreaquecimento pela redução de ventilação para motores convencionais. Problema este que pode ser contornado através do sobredimensionamento da carcaça do motor ou a utilização de ventilação forçada.

Dependendo do material a ser extrudado, também deve-se ter especial atenção à regulação de velocidade do acionamento (precisão de velocidade), pois para extrusoras de plástico ou borracha, a variação de velocidade permitida em relação à velocidade ajustada deve ser menor que 1%, caso que só é possível através de acionamentos com motor de corrente contínua ou conversores de freqüência com controle vetorial.

Como exemplo destas extrusoras, temos as extrusoras de filme plástico e tubos de PVC ou polietileno, onde uma variação de velocidade acarreta em uma alteração do processo produtivo (espessura do filme plástico). Para outros materiais não críticos (ração, fio, etc.), pode-se utilizar conversores de freqüência convencionais.

Outro detalhe que merece muita atenção é com relação a condição de partida do sistema, pois pode haver a possibilidade de se partir a extrusora carregada a quente (conjugado resistente normal) ou carregada a frio (conjugado resistente muito elevado). Para esta última condição, deve-se levar em consideração a sobrecarga inicial da extrusora, que por sua vez

levará a um sobredimensionamento da corrente nominal do conversor de freqüência, proporcional a sobrecarga exigida pela extrusora.

3.5.8 *TREFILAS*

Para este tipo de equipamento, a característica de conjugado é constante para qualquer valor de velocidade, devendo-se atentar para a operação em baixas rotações com sobredimensionamento do motor como descrito anteriormente.

Um outro fator a ser levado em consideração é a condição de sobrecarga na partida quando da introdução do material a ser trefilado, e que deve ser previsto quando do dimensionamento do conversor de freqüência.

Outro fator importante a ser considerado é quando o sistema de trefilação é acionado por mais de um motor (vários puxadores com várias fieiras, com várias bitolas de fiação), onde em muitos casos é necessário o perfeito ajuste de velocidade entre os vários motores (sincronismo) com adequada distribuição de carga entre os puxadores.

Em sistemas deste tipo deve-se fazer uma análise criteriosa a respeito da colocação de acionamento por conversores de freqüência convencionais, pois em muitos casos isto se torna proibitivo, sendo aconselhável a colocação de acionamento através de motores de corrente contínua ou conversor de freqüência com controle vetorial, devido a precisão de velocidade, sincronismo e controle de carga (tração) necessários neste tipo de aplicação.

3.5.9 *MISTURADORES*

Para este tipo de aplicação, a princípio não é possível determinar qual a característica particular do conjugado resistente, uma vez que as condições da carga (material a ser processado) podem variar durante o processo.

Em muitos casos, durante o processo de mistura ou agitação, as características do material se modificam, em função da temperatura, viscosidade, pressão, etc, sendo necessário que seja feita uma análise especifica para a colocação de acionamento por conversores de freqüência, devendo-se ter cuidados com relação a faixa de variação de velocidade, conjugados inicial e final do processo (mínimo e máximo) e a existência de redutores mecânicos.

3.5.10 *SISTEMAS DE ELEVAÇÃO*

Fazem parte desta família de aplicações os GUINCHOS, GUINDASTES, PONTES ROLANTES (IÇAMENTO) e ELEVADORES EM GERAL. Nestes sistemas de elevação, a utilização de acionamentos por conversores de freqüência convencionais e motor de indução trifásico não é geralmente aconselhável, pois neste caso o motor não terá condições de fornecer conjugado com rotor parado (torque com rotação nula).

Esta condição se faz necessária por existir, quando da partida no sistema de elevação (tanto na subida como na descida da carga), um pequeno intervalo de tempo entre a geração da rampa de aceleração e a conseqüente magnetização do motor (geração de correntes rotóricas induzidas devido ao escorregamento e conseqüente surgimento de conjugado motor), em que

ocorre a inversão de rotação do motor e conseqüente queda da carga, podendo até haver o bloqueio do conversor pelo surgimento de picos de corrente consideráveis.

Para este tipo de aplicação é mais indicada a utilização de acionamentos por motores de corrente contínua ou a utilização de conversores de freqüência por controle vetorial que tornam possível o fornecimento de torque mesmo com rotação nula.

3.5.11 *BOBINADORES/DESBOBINADORES*

Os bobinadores/desbobinadores são classificados em dois grupos, sendo:

- Bobinadores/desbobinadores AXIAIS;
- Bobinadores/desbobinadores TANGENCIAIS.

Os bobinadores/desbobinadores AXIAIS são sistemas acionados diretamente pelo eixo da bobina, tendo como característica possuir o conjugado do tipo que varia inversamente com a rotação (hiperbólico), pois no processo de bobinagem, temos a condição as vezes necessária de que a velocidade tangencial do cilindro bobinador seja sempre constante durante todo o processo, isto é, a velocidade superficial da bobina ou a velocidade do material bobinado tem de ser constante. Esta velocidade é definida da mesma forma que nos casos de TORNO DE SUPERFÍCIE/LAMINADOR DESFOLHADOR já visto.

Da mesma forma, para o acionamento deste tipo de carga com motor de indução e conversor de freqüência, pode-se utilizar a faixa de rotação entre zero até a rotação nominal, levando-se em consideração o problema de sobreaquecimento do motor em baixas rotações.

Outra forma de se poder fazer o acionamento é utilizando o motor operando acima de sua rotação nominal, entrando em sua região de enfraquecimento de campo, onde a curva de conjugado resistente da carga e o conjugado motor se assemelham, não havendo problemas de sobrecarga no motor e também não havendo problemas de sobreaquecimento por redução de ventilação.

Para sistemas de bobinamento, deve-se ter cuidado em relação ao material a ser bobinado, pois muitas vezes a colocação de conversores de freqüência convencionais se torna impraticável, devido a precisão de velocidade e controle de tração do material, sendo necessário acionamentos por motores de corrente contínua ou conversores de freqüência com controle vetorial.

Existem vários tipos de bobinadores acionados pelo eixo da bobina onde não é necessário que a velocidade do material a ser bobinado seja constante, podendo no início a sua velocidade ser baixa e no final, alta. Nestas condições, a velocidade do motor não varia, sendo que a carga aumenta com o conseqüente aumento do diâmetro da bobina.

Os bobinadores/desbobinadores TANGENCIAIS são sistemas acionados indiretamente, onde o acionamento do rolo bobinador é feito por um ou mais rolos suportes auxiliares, tendo como característica possuir o conjugado do tipo constante. A velocidade do motor permanece constante durante todo o processo, a fim de manter a velocidade superficial da bobina constante. Este sistema é bem mais simplificado, tendo-se apenas que atentar para a condição de operação do motor em baixas rotações (sobreaquecimento).

3.5.12 *FRESADORAS*

Esta aplicação tem como característica a necessidade de se manter a velocidade de desbaste (retirada de material) constante (velocidade superficial do rebolo constante).

Para isto, é interessante que se possa aumentar a velocidade do rebolo conforme o desgaste do mesmo. Nesta condição, quando o rebolo é novo, a velocidade necessária é baixa e o conjugado alto. Conforme ocorre o desgate do rebolo, a rotação aumenta e o conjugado diminui, podendo o motor operar acima de sua rotação nominal, entrando em sua região de enfraquecimento de campo, onde a curva de conjugado resistente da carga e o conjugado motor se assemelham.

3.5.13 *SISTEMAS DE DOSAGEM*

Entende-se por sistemas de dosagem as aplicações as quais utilizam conversores de freqüência para variar a rotação do motor responsável pela alimentação do sistema, em processos contínuos e que não envolvam controle preciso de quantidade, volume ou vazão. Temos como exemplo aplicações tais como: ESTEIRAS, ROSCA SEM FIM e BOMBAS.

Nestes sistemas, a quantidade a ser fornecida não tem precisão, e o controle de velocidade do dosador é feito através do conversor de freqüência. A velocidade é determinada em função de parâmetros do processo, como corrente, pressão, vazão, temperatura, etc, através de um sistema de realimentação (malha fechada) com operação automática.

Para a utilização de conversor de freqüência nestas aplicações, é necessário a utilização do Regulador PID Superposto para que o sistema responda de forma otimizada sem oscilações ou respostas muito lentas. Para o dimensionamento do motor deve-se levar em consideração os argumentos já discutidos.

3.5.14 *CENTRÍFUGAS*

As centrífugas são equipamentos utilizados para separação de compostos de várias naturezas. Entre estes equipamentos podemos salientar as CENTRÍFUGAS DE AÇÚCAR, ROUPA, PRODUTOS QUÍMICOS, etc. Este tipo de aplicação possui características de conjugado resistente baixo e inércia extremamente alta. O conjugado resistente é devido principalmente a atrito de rolamentos e resistência do ar.

Neste tipo de aplicação os motores, bem como os conversores, devem ser sobredimensionados para permitir a aceleração da carga de alta inércia, levando-se em consideração o tempo de rotor bloqueado do motor (tempo permissível com corrente acima da nominal) e sobrecorrente admissível pelo conversor (atuação da proteção por sobrecarga).

Esta aplicação possui grande potencial para conversores que permitam frenagem regenerativa, pois dependendo do ciclo de carga, a economia de energia proporciona um rápido retorno de investimento. Também podem ser utilizados conversores com frenagem reostática, porém com a energia de frenagem sendo dissipada em banco de resistores.

Os acionamentos mais comuns em centrífugas são constituídos de um motor de dupla polaridade (ex: 4:24 pólos), acionados por chave compensadora, com limitação do número de partidas/hora, com conseqüente limitação da produção. Com a utilização de conversores, pode-se

aumentar o número de partidas/hora e utilizar-se um motor de indução especial, com ventilação independente.

3.5.15 *MOINHOS A TAMBOR*

Entre os tipos de moinho a tambor, salientam-se os MOINHOS DE BOLAS (indústria cerâmica) e por analogia do princípio de funcionamento, são aplicações semelhantes as MÁQUINAS DE LAVAR ROUPA INDUSTRIAL. Este tipo de aplicação possui característica de conjugado que varia linearmente com a rotação, ou seja, quanto maior a rotação, maior o conjugado resistente. Este sistema possui elevadas inércias na partida que dependem diretamente da quantidade de carga do moinho.

Como exemplo, temos a pior condição quando o moinho está carregado pela metade, pois neste caso, o centro de gravidade é deslocado para uma posição diferente do centro do tambor (eixo acionado) causando o problema de excentricidade do acionamento. Devido a esta excentricidade, o conversor sofre uma sobrecarga e deve ser sobredimensionado em sua potência nominal.

O acionamento típico para este tipo de carga é composto por um acoplamento hidráulico, para evitar esforços mecânicos, e a partida é feita por intermedio de chaves compensadoras. A aplicação de conversores de freqüência proporciona algumas vantagens em relação aos métodos convencionais, como:

- diminuição na corrente de partida;
- facilidade para posicionar as bocas do moinho;
- melhoria no fator de potência;
- melhoria na qualidade do produto e principalmente, definindo-se um ciclo ideal de trabalho, ciclo este que depende das características do moinho e do produto a ser processado (moído, lavado, etc), pode-se diminuir o tempo de processamento e com isso economizar energia.

Para dimensionar o inversor é preciso saber:

- Aplicação (tipo de conjugado resistente)
- Dados de placa do motor (Inom)
- Tensão de alimentação
- Características dinâmicas (aceleração e frenagem)
- Faixa de velocidade – velocidades de operação mínima e máxima
- Sistema de acoplamento mentre o motor e a máquina (se houver redutor, qual é o fator de redução ?)
- Sobrecargas na partida ou em operação
- Ambiente (temperatura, altitude, atomosfera)

Exercício 1

Uma esteira transportadora horizontal de uma empresa de mineração, opera a uma altitude de 2000 m, onde a temperatura ambiente é de 35ºC. O motor é acoplado à esteira através de correias com polias em "V" cuja relação de redução é de 2:1 e o rendimento do acoplamento é de 97%. A faixa de variação de velocidade é de 250 rpm a 1150 rpm. Em casos de emergência , onde a esteira deve partir totalmente carregada, a mesma irá partir com o motor ligado diretamente à rede. O conjugado resistente é de 300 Nm e a rede é 440V, trifásica, 60Hz. Determine o motor e o inversor recomendados.

Exercício 2

Utilizada em uma estação de tratamento de efluentes,uma bomba centrífuga necessita operar de de 250 rpm a 1780 rpm.Considerando que o conjugado resistente é de 1.63 kgfm em 1780 rpm, e a rede é 380V, 60Hz. Determine o motor e o inversor recomendados.

Exercício 3

Um motor de 10 CV, IV pólos está instalado em uma esteira transportadora. A mesma sempre parte a vazio. Deseja-se variar a velocidade da esteira utilizando um inversor de frequência na ordem de 1:10. Dimensionar o inversor e verificar se haverá necessidade de trocar o motor. Conside a temperatura ambiente de 40 ºC, altitude menor que 100m, e que o motor possui FS 1.15, a rede é 440V, 60Hz.

Exercício 4

Uma estrusora parte em determinadas condições com o canhão de extrusão frio,possuindo uma sobrecarga na partida de 1.8 vezes o conjugado nominal, que possui valor de 120 kgfm. Sua rotação varai de 100 rpm a 550 rpm, possuindo uma redução de 3:1.Sendo a temperatura ambiente de 45ºC no local da instalação (próximo ao canhão aquecido), rede de 440V, trifásica, 60Hz. Verificar se o motor é capaz de acelerar a máquina de 0 rpm a 550 rpm em 10 seg. Considerar a inércia da carga igula a 1,5 vezes maior que a do motor (não referida).Determine o motor e o inversor recomendados.

Exercício 5

Um torno descascador de toras trabalha com uma variação de velocidade de 400 a 660 rpm. Supondo que não existam sobrecargas no motor, dimensionar o motor e o inversor adequados, sabendo-se que o conjugado resistente da carga é de 100 Nm em 600 rpm e que existe uma redução de 2:1 entre o motor e o torno. A rede é 380V, trifásica, 60 Hz.

3.6 ANEXOS (INVERSORES)

3.6.1 *ANEXO I - MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSOS - PWM (PULSE WIDTH MODULATION)*

Com este método os transistores de potência são acionados e desligados várias vezes, de modo que o valor médio da tensão de saída constante seja variada.

Como mostra a forma de onda da figura (a) a seguir, os transistores do circuito inversor são ligados e desligados de tal maneira que produzem pulsos de igual largura e com a parte de tensão de alimentação fixa igual ao valor da tensão do circuito intermediário de valor E.

Uma melhora na forma de onda, em função da diminuição da quantidade de harmônicos, pode ser obtida variando-se a relação entre os períodos ligado e desligado, como mostra a figura (b):

Figura 3.46 - a) Inversor controlado para fornecer uma forma de onda de tensão recortada.
b) Inversor controlado para fornecer uma forma de onda de tensão modulada por largura de pulsos.

Essa forma de controle é conhecida como modulação por largura de pulsos (PWM), que possui harmônicas de ordem muito menor que outras formas de onda pulsantes, tais como: formas de onda quadrada, onda trapezoidal, onda escalonada e pulsos de largura não controlada, conforme as figuras a seguir:

Figura 3.47 - Formas de onda: a) Quadrada
b) Trapezoidal
c) Escalonada

Esta técnica de PWM assegura uma rotação regular e uniforme dos motores, mesmo em velocidades baixas, devido a uma forma de onda de corrente de saída muito semelhante da senoidal.

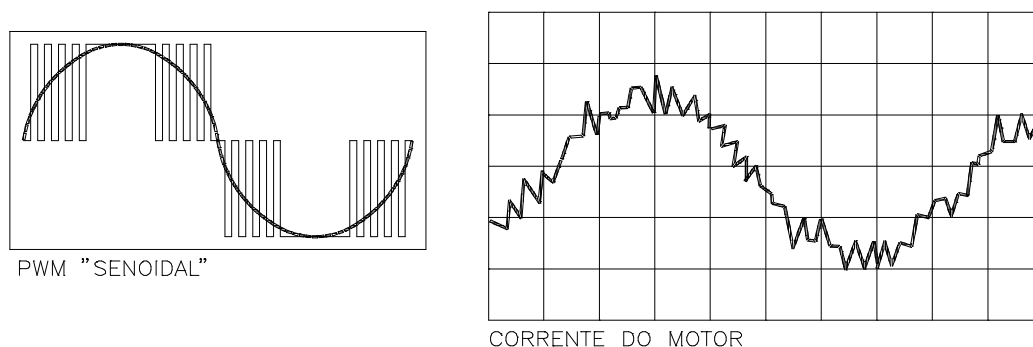



Figura 3.48 - PWM Senoidal e forma de onda da corrente do motor.

Para determinar os pontos de disparo necessários para sintetizar corretamente a modulação por largura de pulsos, um método pode ser usado tomando-se uma senóide de referência e, através do circuito de controle, comparar essa senóide com uma forma de onda triangular como mostra a figura a seguir:

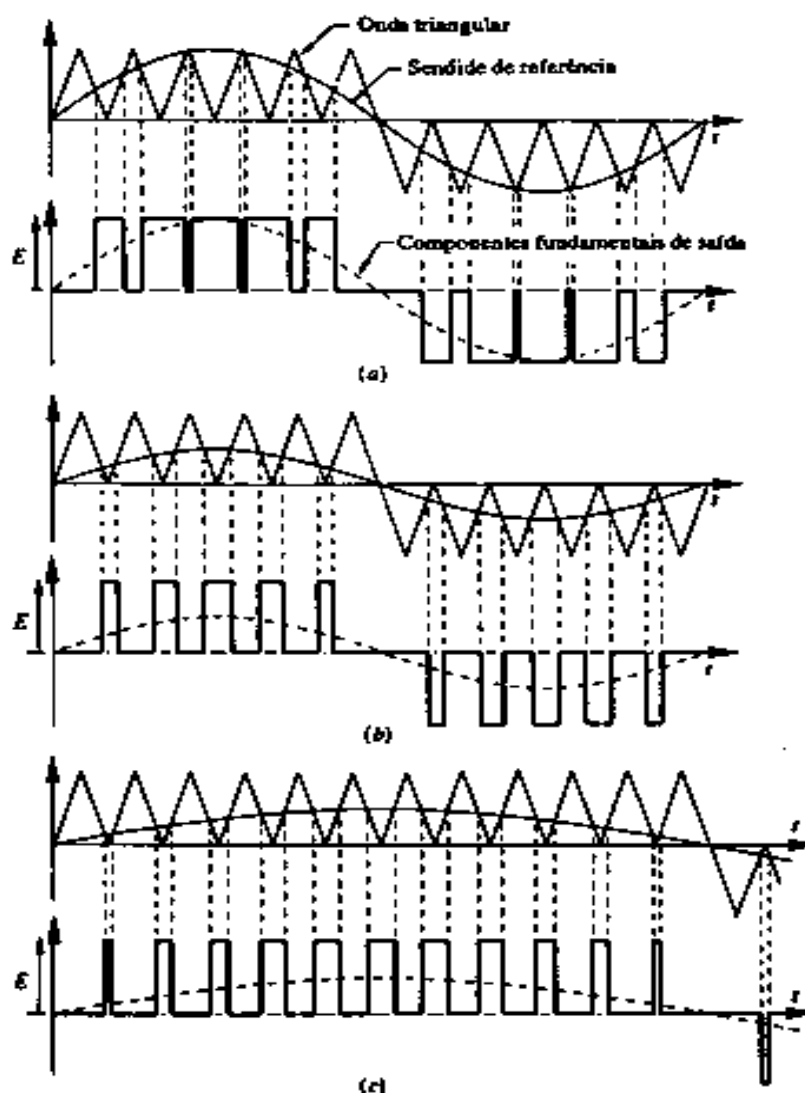



Figura 3.49 - Formação de uma onda PWM.
a) em tensão de saída máxima.
b) em tensão de saída reduzida pela metade.
c) em metade da tensão e metade da freqüência.

O ponto de cruzamento determina o acionamento dos transistores. A figura 349-a mostra uma saída máxima, e a figura 3.49-b mostra uma saída com tensão reduzida pela metade, bastando reduzir também a tensão senoidal de referência pela metade. A figura 3.49-c mostra como uma redução na freqüência da senóide de referência aumenta o número de pulsos em cada meio ciclo.

A justificativa do uso de uma onda triangular pode ser acompanhada com a figura a seguir:

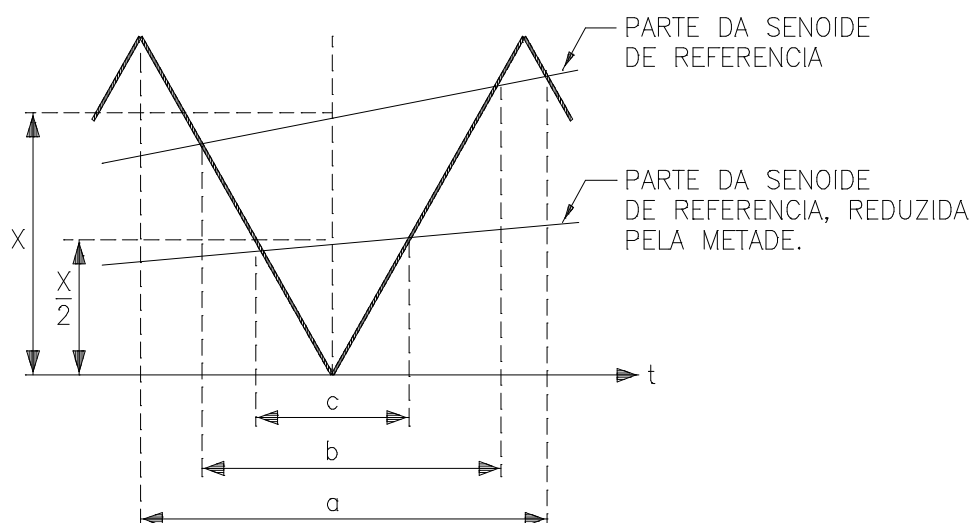



Figura 3.50 - Método de geração de PWM através de onda triangular.

O cruzamento da forma de onda triangular com a senóide de referência produz um pulso de largura b. Reduzindo a senóide pela metade de sua amplitude, teremos um pulso com largura c. Um número elevado de pulsos em um ciclo pode aumentar o número de harmônicas de ordem superior, as quais são muito mais simples para filtrar que as harmônicas de ordem inferior.

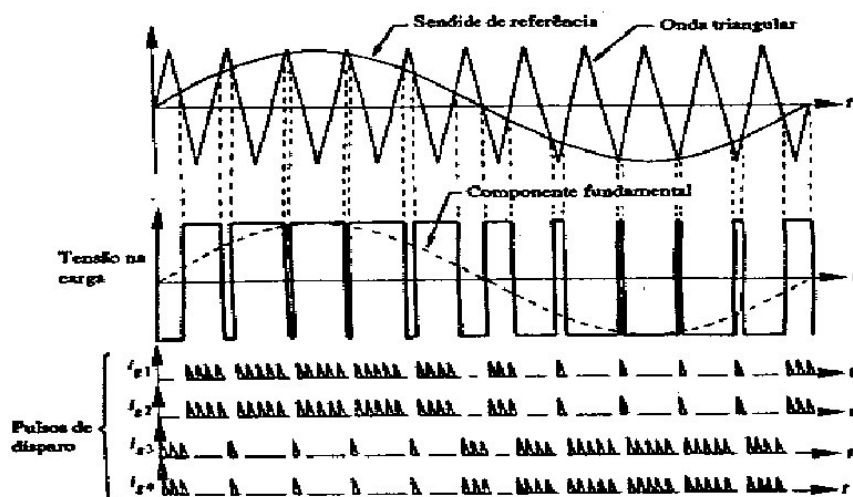



Figura 3.51 - Modulação PWM.

Para determinar os instantes de disparo dos transistores, uma onda triangular de alta freqüência é modulada por uma senóide de referência sem patamares de zero.

A geração dos pulsos para disparo de um inversor trifásico pode ser otimizada através da Injeção de Terceira Harmônica.

A metodologia para o cálculo dos pulsos de disparo é mostrada na figura 3.52. Vemos, neste caso, que a tensão de referência é composta pela soma de uma onda senoidal de freqüência

f com uma parcela de 1/6 da terceira harmônica (3f), o que a difere do método PWM senoidal tradicional.

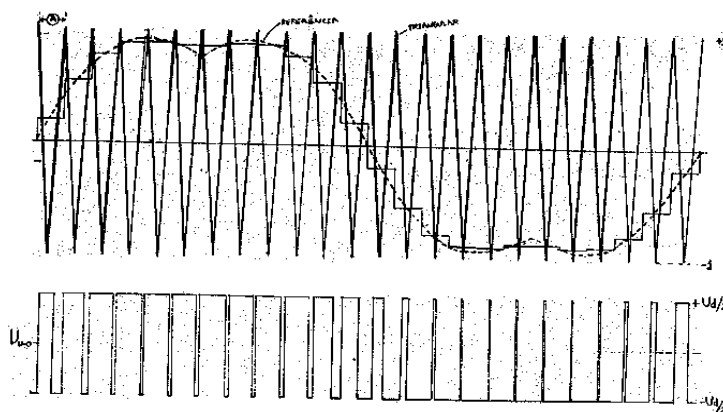



Figura 3.52 - Metodologia para o cálculo dos pulsos.

Como resultado pode-se observar que houve uma redução das harmônicas múltiplas de 3 na tensão de linha de saída do conversor. Portanto a parcela de terceira harmônica somada a referência não aparecerá na saída. As vantagens deste método são a redução do conteúdo harmônico de baixa ordem na tensão de linha e também, a extensão da faixa linear de controle desta tensão, por sobremodulação, até a unidade (k=1). Na figura a seguir apresentamos os espectros das tensões (obtidos com um analisador de espectros) para uma resolução da tensão de referência de 24 pontos/ciclo, K=0.5 e freqüência da fundamental de 30 Hz. Nota-se que a terceira harmônica (90Hz) é reduzida drasticamente na linha (figura 3.53-c). Além disso, a freqüência de comutação (fc), que é um múltiplo de 3 da onda fundamental, é bastante atenuada na linha. Desta forma, restam apenas as bandas laterais (2fc) como as mais significativas na linha.

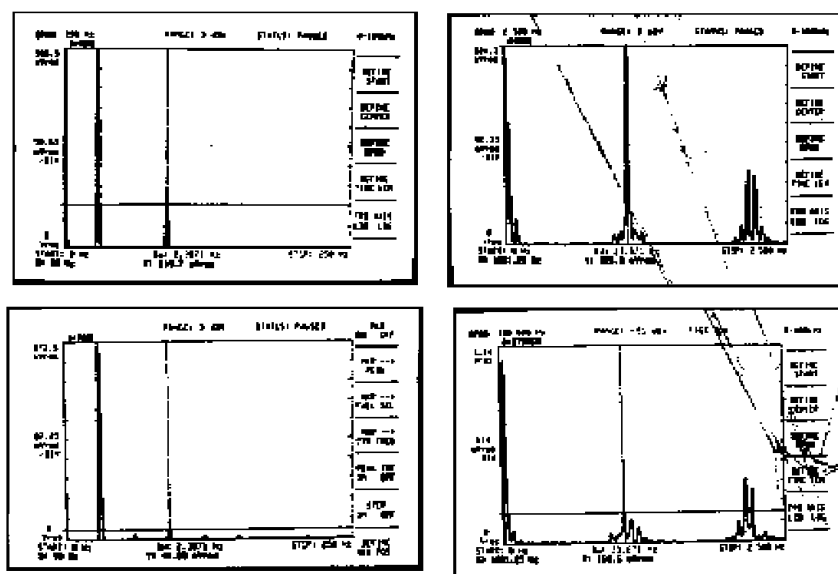



Figura 3.53 Espectros de freqüências (24 pontos/ciclo), k=0.5, f1 = 30Hz.
(a),(b) tensão de entrada
(c),(d) tensão de saída de linha

3.6.2 *ANEXO II - MEDIÇÕES E INSTRUMENTOS DE MEDIDA*

Os instrumentos de medida e os métodos de testes devem ser selecionados com muito cuidado para os conversores de freqüência, devido às harmônicas de corrente na entrada e na saída do mesmo.

Comparações entre medições realizadas com vários instrumentos de medida e medições realizadas com analisadores de freqüência, tem sido feitas para normalizar a escolha do instrumento e do método mais adequado para realizar as medidas das grandezas principais.

Nas características de entrada ou saída do conversor, a tensão de saída deve ser obtida por medidas do valor da onda fundamental RMS que é diretamente relacionada ao torque do motor, e a corrente de saída deve ser obtida através de medições do valor total RMS que é relacionado com o aumento da temperatura do conversor e do motor.

Quando o motor é acionado diretamente da rede, os instrumentos de medida utilizados são, geralmente:

- voltímetro de ferro-móvel;
- amperímetro de ferro-móvel;
- wattímetro eletrodinâmico.

Quando o motor é acionado por um conversor de freqüência, as leituras dos instrumentos serão diferentes das leituras realizadas com acionamento direto da rede, dependendo das componentes harmônicas produzidas pelo sistema de controle do conversor, porque a freqüência de saída varia bastante e muitas harmônicas são incluídas nas formas de onda. Dessa forma, estas medidas deverão ser realizadas com instrumentos especiais.

As medidas das características de entrada para o inversor são basicamente as mesmas que para uma fonte de potência comercial convencional. A seguir, analisaremos os pontos que precisam ser observados:

3.6.2.1 *MEDIÇÃO DA CORRENTE DE ENTRADA*

Medir a corrente RMS usando um amperímetro de ferro-móvel, conforme ilustrado na figura a seguir. Quando a corrente de entrada está desbalanceada, deve-se medir as correntes nas 3 fases e calcular a média dos valores para utilizar como corrente RMS média ($I_{ENTRADA\ MÉDIA}$):

$$I_{(ENTRADA\ MÉDIA)} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

3.6.2.2 *MEDIÇÃO DA POTÊNCIA DE ENTRADA*

Medir a potência de entrada utilizando wattímetros eletrodinâmicos pelo método dos dois wattímetros ou pelo método dos três wattímetros, conforme ilustrado na figura a seguir.

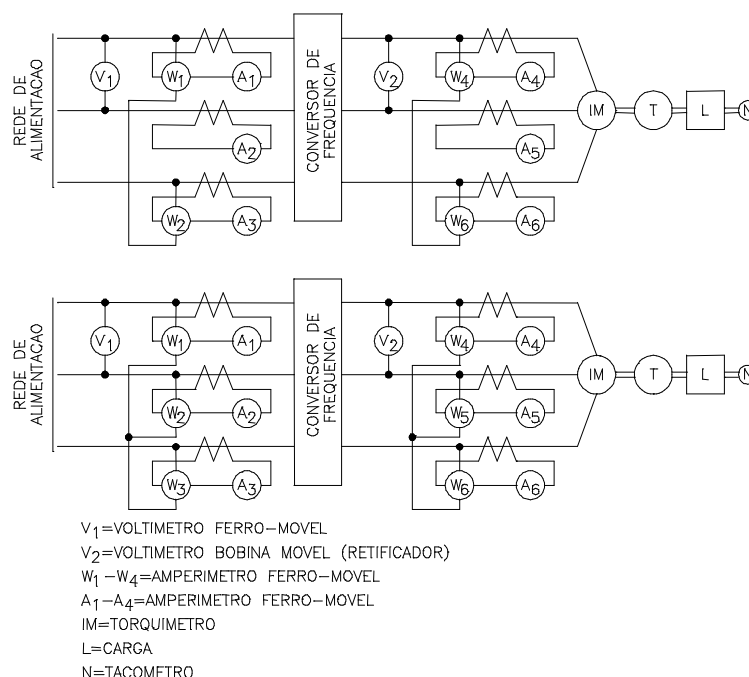



Figura 3.54 - Métodos de medição das potências de entrada e de saída.

Quando as correntes trifásicas forem desbalanceadas, deve-se utilizar o método dos três wattímetros pois no outro método haverá ocorrência de erros.

3.6.2.3 *MEDIÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA NA ENTRADA*

Como a corrente de entrada do inversor geralmente inclui harmônicas, um erro considerável é produzido quando o fator de potência for obtido através de medidas convencionais. Dessa forma, será mais seguro obter este coeficiente pela expressão:

$$FP_{ENTRADA} = \frac{P_{ENTRADA}}{\sqrt{3}.U_{ENTRADA}.I_{ENTRADA}} \times 100\%$$

As grandezas de saída do conversor são importantes para determinar as características de operação do motor quando acionado por um conversor de freqüência, assim sendo, a seguir abordaremos como medir as grandezas de saída do conversor.

3.6.2.4 *MEDIÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA*

O torque do motor depende do valor RMS da onda fundamental da tensão fornecida ao mesmo.

Um voltímetro do tipo retificador precisa ser usado para possibilitar a medição correta da fundamental RMS da tensão de saída do conversor, pois este instrumento fornece o valor mais aproximado da fundamental RMS de tensão obtida com um analisador de freqüências.

A figura a seguir mostra um exemplo de várias medições da tensão de saída de um conversor de freqüência PWM, através de vários tipos de instrumentos. Como indica a figura, o voltímetro do tipo retificador realiza uma leitura muito próxima da fundamental verdadeira.

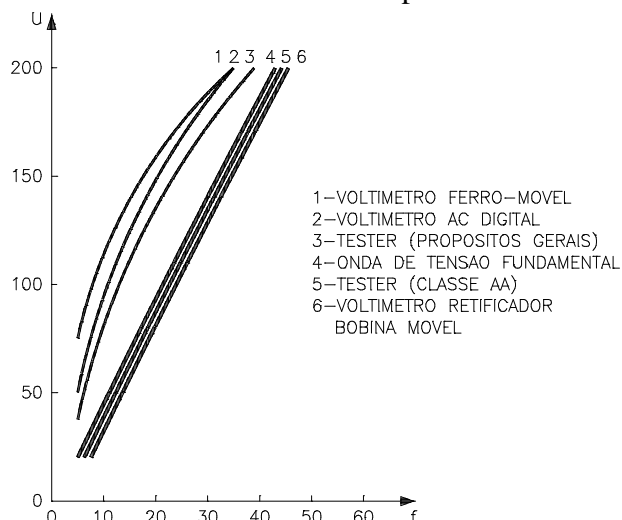



Figura 3.55 - Exemplos de uma mesma medição de tensão de saída realizada com instrumentos diferentes.

3.6.2.5 *MEDIÇÃO DA CORRENTE DE SAÍDA*

A corrente de saída do conversor está relacionada com o aumento de temperatura causado pelas perdas no cobre do motor. O instrumento de medida adequado deverá indicar com precisão o valor total RMS da forma de onda distorcida da corrente. Quando esta medida for realizada com auxílio de transformadores de corrente, deverá ter-se cuidado especial no seu

dimensionamento, pois o mesmo poderá saturar em baixas freqüências. O amperímetro eletrodinâmico e o amperímetro de ferro-móvel podem ser utilizados para tais medidas, porém o amperímetro de ferro-móvel apresenta maiores facilidades no seu manuseio, sendo, portanto, o mais utilizado.

A figura a seguir mostra uma comparação entre duas medidas realizadas com os dois instrumentos para uma carga resistiva, onde se encontra a pior condição pelo fato de não haver atenuação dos picos de corrente de saída, como ocorre naturalmente nas cargas indutivas.

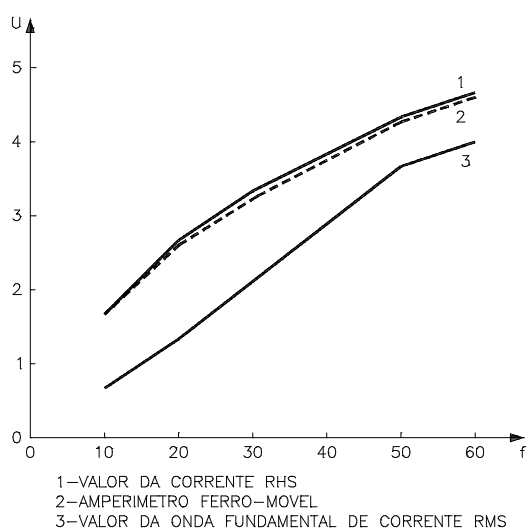



Figura 3.56 - Exemplo de leitura com amperímetros diferentes.

3.6.2.6 *MEDIÇÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA*

A potência elétrica pode ser medida pelo método dos dois wattímetros ou pelo método dos três wattímetros, conforme ilustrado na figura 3.54. São utilizados wattímetros eletrodinâmicos devido à sua boa precisão e por facilitar a leitura e a interpretação dos resultados.

3.6.2.7 *EFICIÊNCIA DOS CONVERSORES*

A eficiência é geralmente definida como a relação entre a entrada e a saída efetivas de potência. Ela pode ser calculada através das medidas da entrada e da saída (com uma carga conectada ao motor-conversor), ou obtida por medidas das perdas.

As perdas que reduzem a eficiência do conversor incluem:

- perdas geradas no dispositivo semicondutor;
- perdas nos capacitores, fusíveis, etc.;
- perdas causadas pelo tipo de método de controle.

A eficiência do conversor é mais fortemente afetada pelas perdas geradas nos dispositivos semi-condutores, nestas perdas estão incluídas as perdas por chaveamento. A figura a seguir mostra um exemplo de eficiência global quando um motor é acionado por um conversor de freqüência.

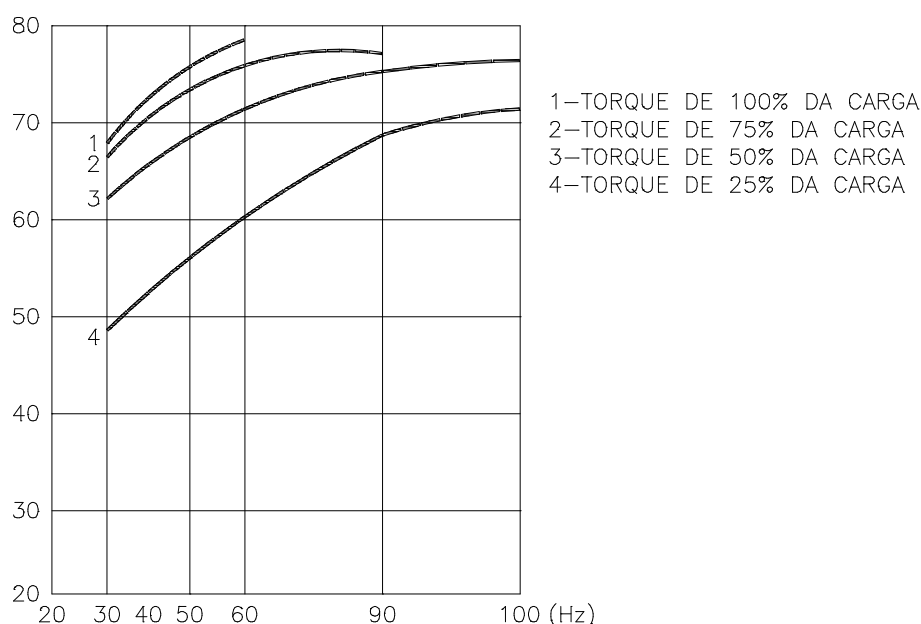



Figura 3.57 - Exemplo de eficiência de um conversor.

3.6.3 *ANEXO III - FUNÇÕES ESPECIAIS DOS CONVERSORES ESTÁTICOS DE FREQÜENCIA*

3.6.3.1 *MULTI-SPEED*

Esta função permite a variação da freqüência de saída do conversor através de combinações das entradas digitais, as quais podem ser comandadas por várias formas, tais como: chaves seletoras, contatores, relés, chaves fim-de-curso, sensores em geral, etc. Seu uso é recomendado quando utiliza-se duas ou mais velocidades fixas (pré-ajustadas), pois traz as seguintes vantagens:

- as freqüências ajustadas dos patamares são mais estáveis e não apresentam influência da temperatura (grande repetibilidade);
- imunidade a ruído elétrico;
- simplificação de comandos e ajustes.

A maior imunidade ao ruído elétrico é importante quando os comandos são feitos a grandes distâncias, evitando o uso de sinais analógicos para referência de velocidade.

3.6.3.2 *CICLO AUTOMÁTICO*

O ciclo automático é utilizado para acionar um motor em uma determinada seqüência de operação a ser repetida a cada liberação do conversor. Conforme demonstrado na figura a seguir, a freqüência de cada patamar, bem como a sua duração podem ser ajustadas (programadas) independentemente.

Após o início do ciclo, o mesmo poderá ser interrompido, sendo que a parada da máquina será feita através de rampa de desaceleração, e poderá ser reiniciado voltando a operar no mesmo ponto em que foi determinada a parada. Ao término do ciclo completo, o conversor aguardará um comando externo que habilite o início de um novo ciclo.

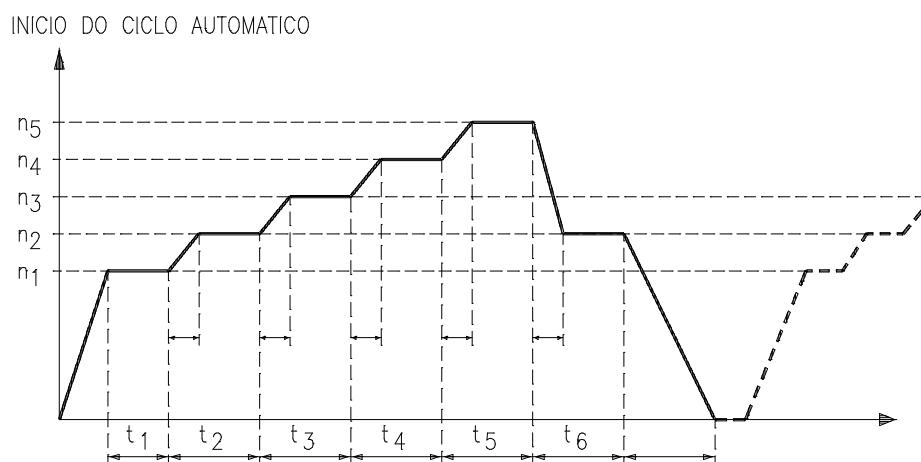



Figura 3.58 - Ciclo automático

Esta função proporciona as seguintes vantagens dentro do processo:

- não necessita de comando externo para troca de velocidades (operador ou dispositivo de comando temporizados);
- as freqüências ajustadas dos patamares são mais estáveis e não apresentam influência da temperatura (grande repetibilidade);
- tempos de atuação precisos e mais estáveis e não apresentam influência externa (grande repetibilidade);
- imunidade a ruído elétrico;
- simplificação de comandos e ajustes;
- eliminação da manutenção de dispositivos de comandos externos;
- maior flexibilidade na programação do ciclo do processo.

3.6.3.3 *REGULADOR PID SUPERPOSTO (TIPO PROPORCIONAL, INTEGRAL E DERIVATIVO)*

3.6.3.3.1 *INTRODUÇÃO*

O uso de conversor de freqüência é comum em aplicações de controle de processos. Nestes casos, deseja-se controlar uma determinada grandeza do processo, sendo a velocidade do motor variada para tanto.
A incorporação da função regulador PID em um conversor de freqüência transforma o acionamento do sistema em malha aberta para um sistema em malha fechada (realimentado), o que permite um controle automático do processo, a partir de uma referência (set-point) definida

pelo mesmo e ajustada (programada) diretamente no conversor de freqüência. Como exemplo temos o controle de vazão:

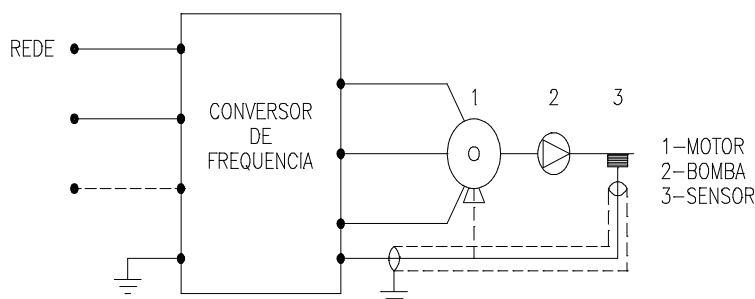



Figura 3.59 - Controle de vazão com conversor de freqüência

Em muitas aplicações, com a utilização do Regulador PID interno evita-se o uso de um controlador de processo externo ao conversor. A seguir detalhamos alguns aspectos práticos relacionados a circuitos de regulação em malha fechada.

3.6.3.3.2 *CIRCUITOS DE REGULAÇÃO*

O principal objetivo de um conversor é regular a velocidade do motor, tornando-a insensível às variações de carga. Através de um sinal de referência (Ex: 0-10 Vcc, 0-15 Vcc, 0-20 mA, 4-20 mA, etc) ajustamos um nível de velocidade desejado, que deverá ser mantido independente da carga. Para a construção de circuitos de regulação são usados amplificadores operacionais, cujas principais características são : Alta impedância de entrada, alto ganho e baixa inércia. Os circuitos de regulação devem possuir as seguintes características :

1) Baixo desvio entre o valor de controle e o valor controlado;
2) Alta estabilidade;
3) Boa dinâmica de regulação, isto é, após uma perturbação a nova condição em regime permanente deve ser atingida o mais rápido possível.

Sistema de Controle em Malha Fechada

Neste tipo de sistema, a variável de saída é regulada mediante o envio de uma amostra de seu valor à entrada (realimentação). Na figura a seguir temos um diagrama simplificado de um sistema em malha fechada.

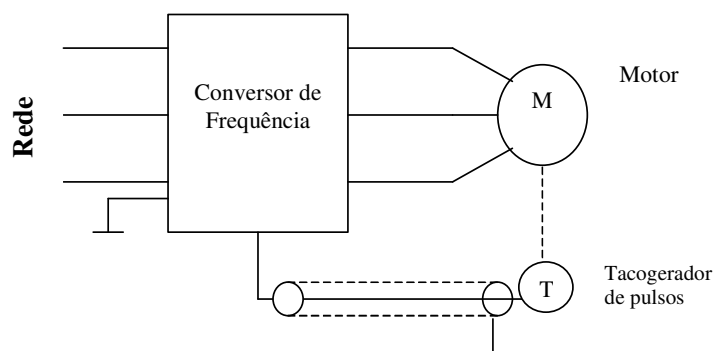



Figura 3.60 - Conversor realimentado por tacogerador de pulsos.

Um exemplo prático é o do conjunto motor, realimentado por tacogerador. Neste caso, o taco gerador (G) informa ao conversor qualquer variação de velocidade que ocorra no motor. Desta forma, o conversor, através de seus reguladores, alteram a freqüência de saída, modificando assim a velocidade do motor. Logo, quanto mais rápida for a resposta dos reguladores, menor será a variação da velocidade e mais estável será o sistema.

Comportamento Dinâmico de um Regulador em Malha Fechada :

O comportamento dinâmico de um regulador em malha fechada é a resposta transitória que ele fornece devido a uma variação de entrada (por exemplo a variação na referência de velocidade) ou devido a uma flutuação (distúrbio) na variável de saída (por exemplo a inserção ou retirada de carga do motor).

Este comportamento é caracterizado pelo tempo de iniciação da regulação (tempo de subida-TS) tempo de regulação do valor de referência (TR) e ultrapassagem máxima (a), conforme gráficos.

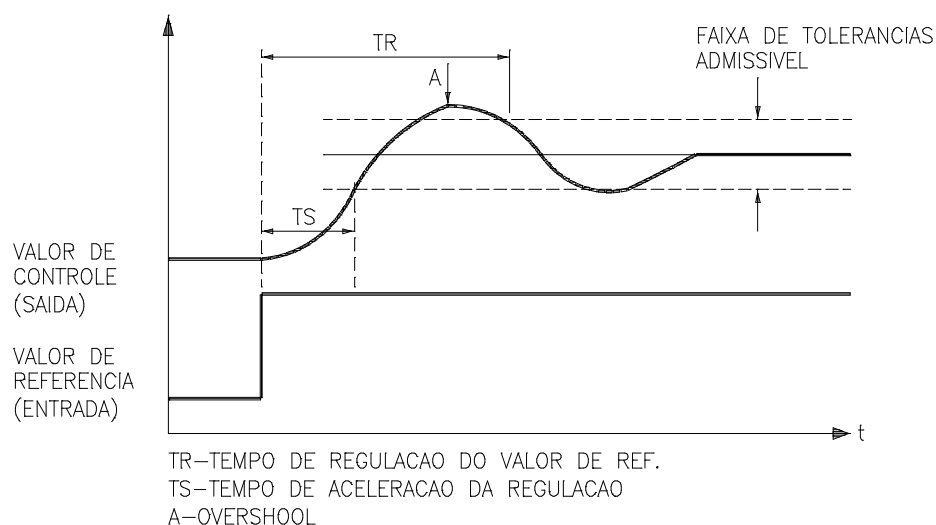



Figura 3.61 - Regulação devido a uma alteração na variável de entrada

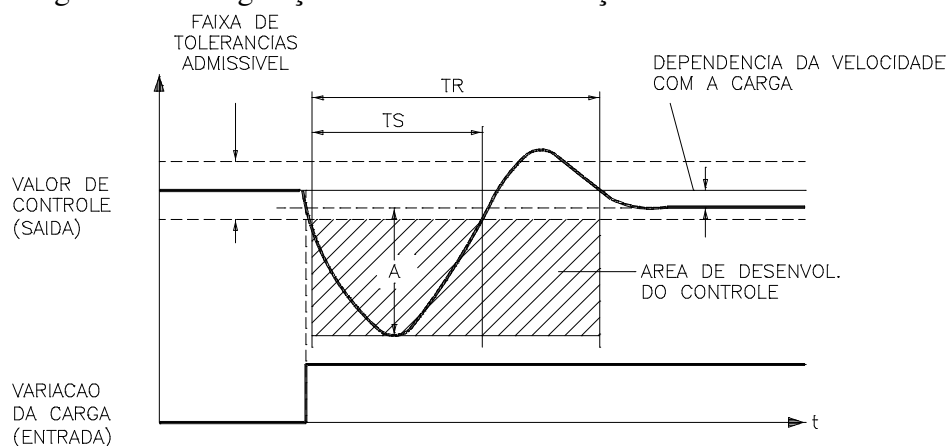
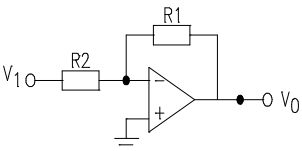
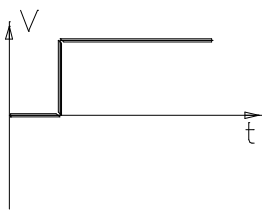
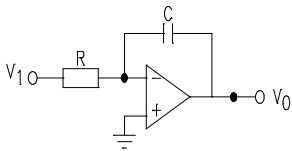
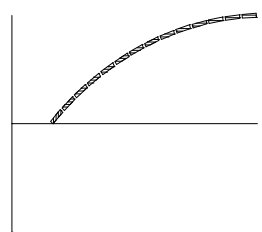
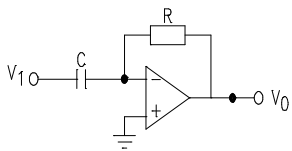
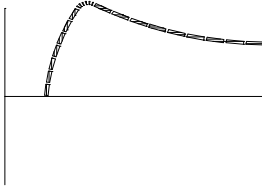
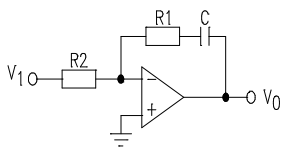
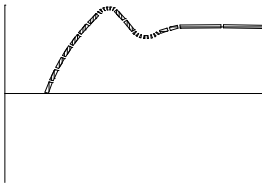
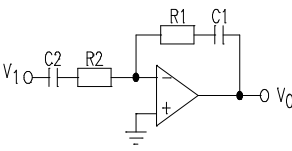
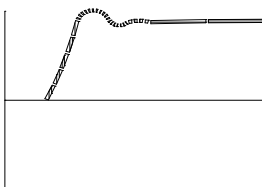



Figura 3.62 - Regulação devido a uma perturbação na saída.

O tempo de subida (TS) inicia-se no momento em que a perturbação é inicializada e é contado até que o valor da perturbação atinja a faixa de regulação pela primeira vez (costuma-se defini-lo como o tempo em que a variável leva para passar de 10% a 90% de seu valor desejado).

O tempo de regulação (TR) é o tempo a partir do qual a variável permanece dentro da caixa de regulação, contando do momento da perturbação.

A ultrapassagem máxima (A) dá a limitação ao máximo valor alcançado pela variável durante o transitório.

3.6.3.3.3 PRINCIPAIS TIPOS DE REGULADORES

TIPO	ESQUEMA	FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	GRÁFICO
PROPORCIONAL (P)	V1, R2, R1, V0	$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_1}{R_2}$	V, t
INTEGRAL (I)	V1, R, C, V0	$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{1}{S.R.C}$	
DERIVATIVO (D)	V1, C, R, V0	$\frac{V_o}{V_i} = -S.R.C$	
PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)	V1, R2, R1, C, V0	$\frac{V_O}{V_i} = \frac{R_2.C.s + 1}{R_1.C.s}$	
PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)	V1, C2, R2, R1, C1, V0	EQUAÇÃO I	

Equação I:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{R_2}{R_1} \times \frac{(1 + S.R_2.C_2)\times(1 + S.R_1.C_1)}{S.R_1.C_1}$$

Onde: V_o = Tensão de entrada;
V_i = Tensão de saída;
S = jω (operador da Transformada de Laplace)

3.6.3.4 *REALIMENTAÇÃO DE VELOCIDADE POR TACOGERADOR DE PULSOS*

A configuração padrão do conversor apresenta controle de velocidade em malha aberta. Neste caso a precisão de velocidade depende do escorregamento do motor. Valores típicos de regulação situam-se entre 3% a 5% da velocidade nominal para variações de carga no eixo de 0 a 100% da carga nominal.

A operação em laço fechado de velocidade tem o objetivo de melhorar a precisão desta com as variações de carga. Para isto, deve ser acoplado ao eixo do motor um encoder do tipo incremental (tacogerador de pulsos) utilizado como sensor de velocidade.

Neste caso é possível atingir-se uma precisão de até 0,5%, para uma variação de carga de 0 a 100% da carga nominal, com velocidades entre 10% a 100% da rotação nominal.

Além da instalação do encoder incremental, o conversor deverá ser configurado para operar como "regulador de velocidade". Com esta configuração, o conversor utiliza o regulador PID interno para que o conversor tenha uma resposta otimizada na regulação de velocidade (a mais rápida e sem oscilações), para cada tipo de aplicação.

3.6.3.5 *CURVA U/F AJUSTÁVEL*

Esta função permite a alteração das curvas características padrões definidas, que relacionam a tensão e a freqüência de saída do conversor e consequentemente o fluxo de magnetização do motor, a fim de adequar a uma necessidade específica.

Esta característica pode ser utilizada em aplicações especiais nas quais os motores utilizados necessitam de tensão nominal ou freqüência nominal diferentes dos padrões. O ajuste da relação entre a tensão e a freqüência é feito através do software do conversor (parâmetros de programação), onde se define a inclinação de uma reta (conforme ilustrado na figura a seguir) através de três pares (U,f) de pontos distintos que são: Ponto mínimo, ponto médio e ponto máximo.

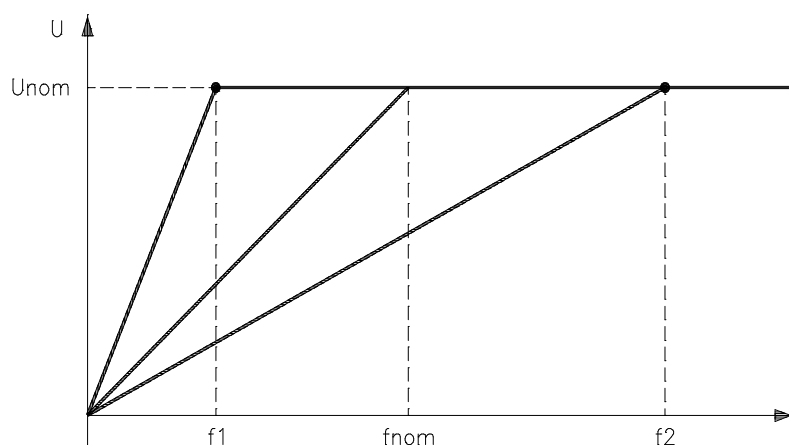



Figura 3.63 - Curva U/f ajustável

Esta característica é necessária, pois nestes casos o fluxo de magnetização do motor é diferente dos motores padrões, o que pode acarretar picos de corrente ou operação com corrente acima da nominal do motor, que podem ocasionar a sua destruição ou bloqueio do conversor.

3.6.3.6 *REJEIÇÃO DE FREQÜÊNCIAS CRÍTICAS (SKIP FREQUENCY)*

Este recurso é utilizado quando o sistema a ser acionado possui faixas de operação com rotações críticas e que não podem ser utilizadas. Como exemplo, problemas de ressonância mecânica em ventiladores, que causam a vibração excessiva do mesmo, podem causar a destruição de rolamentos e eixos.

A rejeição de freqüências críticas é feita através do ajuste da freqüência central e de uma banda em torno desta freqüência a qual o conversor não permitirá acionar o motor, conforme mostra a figura:

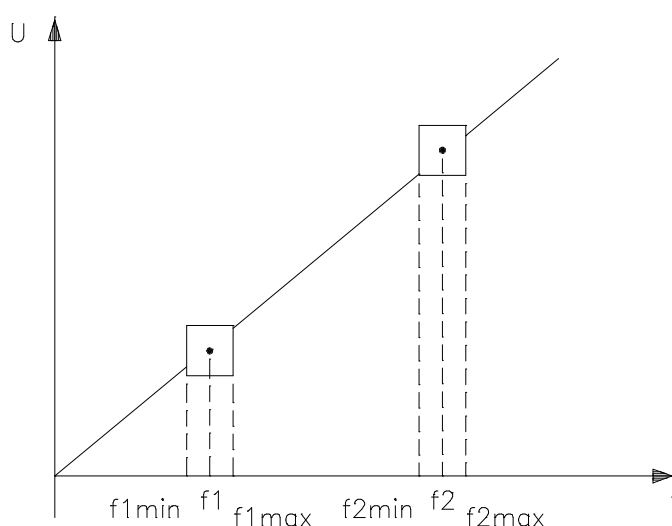



Figura 3.64 - Rejeição de freqüências críticas

Quando da aceleração ou desaceleração do motor, o conversor atua através das rampas ajustadas, passando pelas freqüências críticas, chegando aos valores desejados. Caso o valor ajustado seja uma freqüência crítica, o conversor irá operar na freqüência imediatamente acima ou abaixo do limite imposto.

3.6.3.7 *PARTIDA COM MOTOR GIRANDO (FLYING START)*

Este recurso é utilizado para quando é necessário o religamento do motor com o conversor de freqüência mesmo que o motor (ou máquina) ainda esteja em movimento. Para os conversores comuns sem este recurso, o religamento não é possível devido ao fato de que quando o motor ainda encontra-se girando, existe uma magnetização residual que faz com que seja gerada uma tensão nos seus terminais. Com o religamento do conversor, surgem então picos de corrente transitórias que faz com que a proteção contra curto-circuito do conversor atue,

bloqueando o conversor. Com o recurso de partida com motor girando, o conversor atua de forma a impor a tensão de alimentação sem contudo bloquear pelo pico de corrente transitória.

3.6.3.8 *FRENAGEM CC*

Este tipo de frenagem do motor é conseguida aplicando-se no seu estator uma tensão contínua. Esta é obtida pelo disparo dos transistores do conversor, não necessitando nenhum dispositivo adicional. Este tipo de frenagem é útil quando se deseja a parada do motor (freio) apenas, diferentemente da frenagem reostática que pode ser utilizada para reduzir a velocidade, mas mantendo-se o motor girando. O torque de frenagem pode ser ajustado de acordo com a aplicação, através do tempo de injeção de corrente contínua e do nível de tensão CC aplicada no motor. Durante a frenagem CC, é necessário um intervalo para a desmagnetização do motor (Tempo Morto), para não haver um pico de corrente no conversor, que poderá atuar a proteção e bloquear o mesmo.

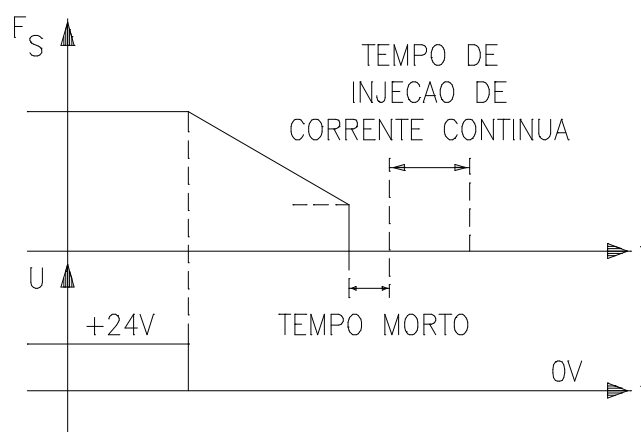



Figura 3.65 - Frenagem CC com bloqueio por rampa de desaceleração

3.6.3.9 *FRENAGEM REOSTÁTICA*

Este tipo de frenagem é utilizado nos casos em que são desejados tempos de desaceleração curtos ou quando forem acionadas cargas de elevada inércia.

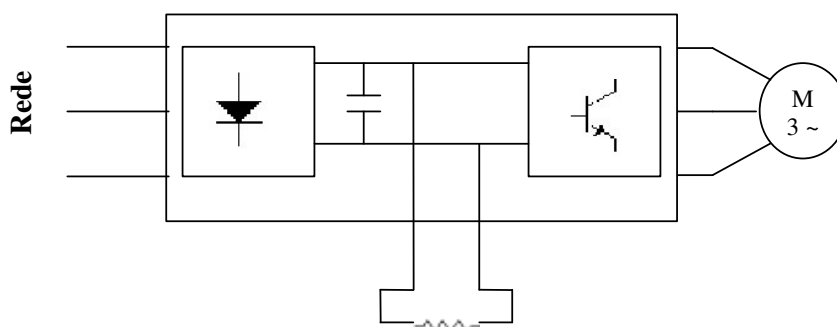



Figura 3.66 - Conversor com frenagem reostática

3.6.3.10 *RAMPA "S"*

A aceleração/desaceleração por rampa "S" é um recurso no qual se permite obter a aceleração/desaceleração de cargas onde se necessita de uma partida/parada de forma mais suave, não ocorrendo choques mecânicos no sistema. A rampa "S" pode ser ajustada em função da aplicação através do software do conversor (parâmetros de programação), onde se define os tempos de aceleração e desaceleração e também o percentual de distorção "S" da curva, conforme descrito na figura a seguir:

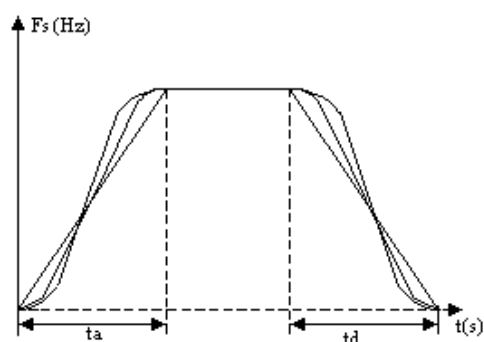
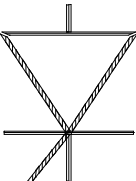
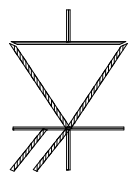
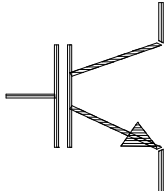
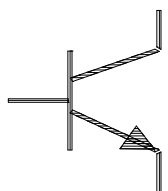
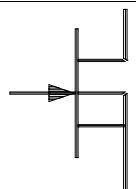



Figura 3.67 - Aceleração e desaceleração por rampa "S"

3.6.4 *ANEXO IV - SEMICONDUTORES DE POTÊNCIA*

A seguir apresentamos os tipos, simbologia e características de operação de alguns semicondutores de potência utilizados em conversores estáticos (CA/CC ou CA/CA).

TIPO	*SÍMBOLO*	*CARACTERÍSTICAS*
TIRISTOR SCR		- Ligamento pelo GATE - Robusto - Baixo custo - Ampla potência de operação (até 30 MVA) - Baixa freqüência de operação (menor que 100 Hz para tiristores normais) - Drivers (controladores) simplificados
TIRISTOR GTO		- Ligamento e desligamento pelo GATE - Drivers (controladores) complexos - Freqüência de operação menor que 1 kHz - Faixa de potência de 100 kVA até 3 MVA
TRANSISTOR IGBT		- Ligamento e desligamento pelo GATE - Chaveado por tensão - Freqüência de operação menor que 20 kHz - Faixa de potência de 1 kVA até 100 kVA - Tamanho reduzido dos drivers (controladores)
TRANSISTOR BIPOLAR BJT		- Ligamento e desligamento pelo GATE - Chaveado por corrente - Freqüência de operação menor que 5 kHz - Faixa de potência de 500 VA até 250 kVA (sem a necessidade de colocação de módulos em paralelo)
TRANSISTOR MOSFET		- Ligamento e desligamento pelo GATE - Chaveado por tensão - Freqüência de operação menor que 800 kHz - Faixa de potência de 10 VA até 10 kVA - Tamanho reduzido dos drivers (controladores)

3.6.5 ANEXO V - COMPARATIVO DOS SISTEMAS DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE

TIPO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
VARIADORES MECÂNICOS	- Baixo custo de aquisição	- Apenas controle manual e local - Peças sujeitas a desgastes e quebras - Fator de potência menor que 1 - Utilização em baixas potências
VARIADORES HIDRÁULICOS	- Alto torque em baixas rotações	- Baixo rendimento - Pequena faixa de variação - Manutenção
VARIADOR ELETROMAGNÉTICO	- Baixo custo de aquisição - Operação automática - Permite sincronismo	- Baixo rendimento - Dimensões e pesos elevados - Fator de potência menor que 1 - Lubrificação freqüente - Difícil manutenção - Velocidade máxima = velocidade motor
MOTORES DE ANÉIS	- Alto torque de partida - Controle simples	- Baixo rendimento - Perdas proporcionais ao escorregamento - Fator de potência menor que 0,8 - Existência de anéis e escovas - Pequena faixa de variação
VARIADORES DE TENSÃO	- Utilização de motores de indução padrão - Sistema eletrônico simples	- Baixo rendimento - Maior escorregamento - Fator de potência variável e menor que 0,8 - Pequena faixa de variação
CONVERSORES CA/CC	- Alta precisão de velocidade 0,01% digital - 0,1% analógico - Sincronismo com alta precisão - Torque controlável - Ampla faixa de variação de velocidade - Frenagem regenerativa	- Limitação de velocidade devido a comutação (4000 rpm) - Preço do motor - Manutenção - Dimensões e peso do motor - Impossibilidade de operação em áreas de risco - Fator de potência é variável com a rotação
CONVERSORES DE FREQUÊNCIA	- Utilização de motor de indução padrão - Peso e dimensões reduzidas - Ampla faixa de variação de velocidade - Operação em áreas de risco - Disponibilidade de "BY-PASS" - cos φ (fator de deslocamento) próximo de 1	- Preço elevado para aplicações que requerem sincronismo de alta precisão - Frenagem regenerativa somente com alto custo

4 SERVOACIONAMENTOS

4.1 INTRODUÇÃO

O motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica, usualmente disponibilizada num eixo em rotação (ver figura 1).

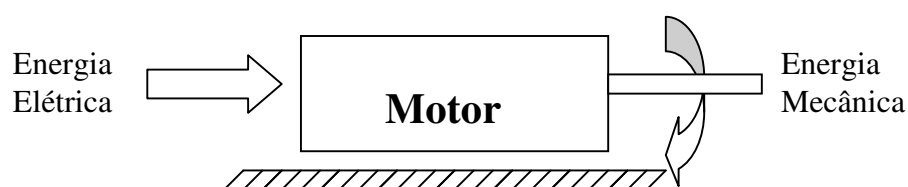



Figura 1 – Transdutor de energia.

A ação motora é aproveitada no acionamento de diversos tipos de máquinas e equipamentos, que podem ser classificados nos seguintes grupos:

- Transporte de fluidos incompreensíveis (bombas de água ou de óleo);
- Transporte de fluidos compreensíveis (ventiladores, compressores e exaustores);
- Processamento de materiais metálicos (máquinas operatrizes, tais como: furadeiras, prensas, tornos etc;
- Processamento de materiais não metálicos (processamento de madeiras: serras de fita e circulares, lixadeiras e furadeiras; produtos alimentícios: extrusoras de massas, moinhos e descascadoras; produtos cerâmicos: marombas e prensas; produtos químicos: reatores e misturadores; produtos plásticos: injetoras e extrusoras; produtos agrícolas: picadores, ordenhadeiras e trituradores; aparelhos eletrodomésticos);
- Manipulação de cargas (elevadores, escadas, pontes rolantes, talhas, guindastes e correias transportadoras);
- Transporte de cargas e de passageiros (metrô, trens e carros elétricos).

Estima-se que mais de 40% de toda energia elétrica consumida no país é destinada ao acionamento de motores elétricos em geral. No setor industrial como um todo, pouco mais da metade da energia elétrica é consumida por motores. Os outros pontos de forte consumo são os processo eletroquímicos, aquecimento e iluminação. São comuns as indústrias nas quais mais de 80% do consumo de energia elétrica é de responsabilidade dos motores. Os tipos mais comuns de motores elétricos são:

- Motores de corrente contínua: são motores de custo mais elevado e, além disso, precisam de uma fonte de corrente contínua, ou de um dispositivo que converta a corrente alternada comum em contínua. Pode funcionar com velocidade ajustável entre amplos limites e se prestam a controles de grande flexibilidade e precisão. Por isso, seu uso é restrito a casos especiais em que estas exigências compensam o custo muito mais alto da instalação;
- Motor síncrono: funciona com velocidade fixa, utilizado somente para grandes potências (devido ao seu alto custo em tamanhos menores) ou quando se necessita de velocidade invariável;

- Motor de indução: funciona normalmente com velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo, é o motor mais utilizado de todos, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas, encontradas na prática. Atualmente é possível controlarmos a velocidade dos motores de indução com o auxílio de inversores de freqüência.

O servomotor é um motor que pode ter a velocidade e/ou posição de seu eixo controladas. Um servomotor deve necessariamente ter um sistema de potência e outro de controle para poder desempenhar sua funções. Eles são aplicados em:

- Máquinas-ferramenta a comando numérico (*CNC*);
- Sistemas de posicionamento;
- Linhas de transporte;
- Robôs industriais;
- Sistemas flexíveis de manufatura e etc.

Nestas aplicações, o torque máximo requerido está entre 0,1 N.m e 100 N.m; a velocidade entre zero (parado) e 10000 rpm e a potência entre 0,1 kw e 20 kw. Independente da aplicação específica, os servomotores devem ter as seguintes características gerais:

- Alta dinâmica de torque ➔ Rápido controle de corrente;
- Alta dinâmica de velocidade ➔ Baixo momento de inércia, baixas indutâncias e alto torque máximo;
- Alta capacidade de sobrecarga mecânica ➔ Alto torque máximo e boa rigidez mecânica;
- Alta capacidade térmica ➔ Alto tempo de aplicação de sobrecarga mecânica e de corrente sem sobreaquecimento;
- Alto torque contínuo;
- Característica torque x velocidade linear, mesmo em sobrecargas;
- Larga faixa de controle de velocidade;
- Operação suave, mesmo em baixas velocidades (baixo *ripple* de torque ou *"cogging"*);
- Alta precisão no posicionamento;
- Projeto compacto ➔ elevada relação potência/volume;
- Alta confiabilidade, baixa manutenção e longa vida;
- Inexistência de ressonâncias mecânicas e baixo ruído;
- Alto rendimento;
- Relação custo/desempenho aceitável;
- Dimensões reduzidas.

O servomotor que melhor atende às características descritas acima é o servomotor síncrono de imãs permanentes, também chamado de servomotor CA ou servomotor CC sem escovas (brushless DC servomotor), por ter um comportamento idêntico ao motor de corrente contínua. Convém lembrar que o servomotor CA é comutado eletronicamente, sendo por isso, também chamado de motor a ímã permanente de comutação eletrônica.

4.2 DESCRIÇÃO DO SERVOMOTOR

É uma máquina elétrica que converte a energia elétrica em energia mecânica. Os três tipos de servomotores mais utilizados são:

- servomotores de corrente contínua;
- corrente alternada síncronos;
- corrente alternada assíncronos.

A utilização de um determinado tipo de servomotor com seu respectivo servoconversor depende de vários critérios, tais como: dinâmica, torque máximo, capacidade de sobrecarga, velocidade, manutenção, regime de trabalho, preço entre outros. A seguir veremos cada um destes tipos de servomotores mais detalhadamente.

4.2.1 *SERVOMOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA*

São motores de custo mais elevado e, além disso, precisam de uma fonte de corrente contínua, ou de um dispositivo que converta a corrente alternada comum em contínua. Esses servomotores apresentam um rotor cujas espiras formam sua armadura, e por um estator dotado de imãs permanentes, os quais fornecem o campo de excitação da máquina, estabelecendo-se um fluxo magnético radial em relação ao rotor.

Nesta forma construtiva, o torque produzido pelo servomotor é proporcional à corrente de armadura.

$$C = \phi . I_r \qquad (1)$$

A velocidade é proporcional à FCEM induzida (força contra-eletromotriz). O campo é constante, pois é gerado pelos imãs permanentes.

$$\phi = \frac{\varepsilon}{f} \qquad (2)$$

O controle deste tipo de servomotor pode ser feito por um servoconversor relativamente simples e com isso obtemos um razoável desempenho. Em máquinas de corrente contínua o controle de fluxo é feito através do controle independente da correntes do circuito de excitação e da armadura esta última sendo usada para controlar o torque. Apesar destas características , existem alguns aspectos negativos relacionados a sua forma construtiva mecânica:

- o calor gerado no enrolamento da armadura não pode ser retirado rapidamente e de maneira eficiente, de modo que as sobrecargas são críticas sob o ponto de vista térmico;
- o comutador é montado sobre o eixo do rotor, ocasionando um aumenta do momento de inércia, assim, piorando as características dinâmicas do servomotor. O faiscamento e o atrito entre o coletor e as escovas do comutador exigem manutenção periódica destas escovas. O servomotor *CC* apresenta uma inércia relativamente elevada devido ao fato de que o rotor é formado pelas lamelas do coletor, eixo e chapas de aço cujas ranhuras são alojadas as espiras de armadura. A fim de minimizar a inércia, procura-se construir o rotor de forma que o mesmo tenha o menor diâmetro possível, aumentando-se seu comprimento.

Existem muitos tipos construtivos de servomotores CC, dependendo da aplicação para qual os mesmos se destinam.

4.2.2 *SERVOMOTOR CA ASSÍNCRONOS*

Devido à sua forma construtiva robusta, simples e sua baixa manutenção, o motor assíncrono (indução) já é utilizado há cerca de um século em aplicações industriais. Sua construção mecânica e elétrica simples traz vantagens de custo, se comparado com motores CA síncronos ou CC. O rotor do motor assíncrono é formado por barras de alumínio curto-circuitadas, formando uma gaiola.

A utilização do motor assíncrono como servomotor não traz modificações significativas no motor em si. Neste, é realizada a otimização do projeto do rotor, a fim de diminuir ao máximo as inércias e a inclusão de um sensor de posição do rotor com elevada resolução. Freqüentemente é utilizada também a ventilação forçada.

As vantagens na forma construtiva mecânica do motor, porém, levam a um modelamento complexo do servomotor assíncrono. Este modelo é constituído por um sistema de múltiplas grandezas físicas acopladas entre si, dentre as quais, grandezas internas do motor como o fluxo magnético e o torque. Estas grandezas não podem ser medidas diretamente e podem ser obtidas somente através de recursos técnicos adicionais. Para se obter o desacoplamento destas grandezas, é utilizado o princípio de regulação por orientação de campo. A transformação utilizada nos servomotores CA assíncronos está referenciada no vetor de fluxo magnético, ao invés do rotor, como ocorre nos servomotores CA síncronos.

Para a transformação no sistema de coordenadas de campo, o ângulo do vetor de fluxo deve ser conhecido em tempo real. A medição do vetor de fluxo com dispositivos auxiliares é a princípio possível, mas não praticável para aplicações industriais. Assim é empregado um modelo de fluxo que fornece um vetor de fluxo a partir de grandezas que podem ser medidas. Para obter o desacoplamento perfeito entre fluxo magnético e o torque, o sistema de regulação por coordenadas de campo necessita também do valor exato da constante de tempo do rotor.

Em máquinas de corrente alternada a ímãs permanentes, torna-se necessário um controle da corrente de alimentação da máquina, de modo a que uma parcela dela seja capaz de se opor ao fluxo produzido pelos ímãs. Esse processo pode ser aplicado tanto nas máquinas chamadas corrente contínua sem escovas (“brushless”), como nas máquinas síncronas a ímãs permanentes.

A implementação tecnológica e econômica do servoconversor para o servomotor CA assíncrono exige a utilização processadores rápidos, como DSP’s (Digital Signal Processor), pois o fluxo é calculado por um modelo matemático a partir de grandezas facilmente mensuráveis, como a posição do rotor, corrente e velocidade.

Dinamicamente, o servomotor CA assíncrono é um desenvolvimento relativamente recente, cerca de uma década, sendo encontrado como acionamento em máquinas-ferramenta de grande porte, onde os requisitos de dinâmica são menos rigorosos, devido a grande inércia da própria máquina.

4.2.3 *SERVOMOTORES CA SÍNCRONOS*

A máquina síncrona de imãs permanentes é constituída por um estator com enrolamentos das fases distribuídas de forma semelhante aos de uma máquina assíncrona. O núcleo magnético do estator é constituído em aço laminado com ranhuras para alojar os condutores dos enrolamentos. O rotor, cujo núcleo pode ser em ferro sólido, possui um certo número de pares de imãs permanentes regularmente distribuídos ao longo da sua periferia.

Existem três vantagens inerentes aos motores síncronos que o tornam particularmente indicados para alguns tipos de acionamentos:

- O rendimento do motor síncrono é maior que o do motor de indução equivalente, particularmente em baixas rotações;
- Motores síncronos podem operar com fator de potência capacitivo ou unitário;
- A rotação é rigorosamente constante com freqüência de alimentação. Isto permite que o motor seja diretamente acoplado à carga, mesmo em baixas rotações, onde um motor de indução exigiria um redutor de velocidades, pois estes, em baixas rotações apresentam rendimento e fator de potência pobres.

Com os modernos materiais magnéticos à base de terras raras, entre os quais se destacam os de samário-cobalto (Bhmáx = 34 kJ/m3)e os de ferro-boro-neodímio (Bhmáx = 320 kJ/m3), o fluxo de excitação pode ser criado, com grande coercividade, através de imãs de pequena espessura e baixa densidade. Deste modo, o rotor pode ser construído com pequeno diâmetro e o seu momento de inércia torna-se bastante inferior ao de um motor de indução trifásico de mesma potência. Como não possuem enrolamentos no rotor e os imãs não são condutores, as perdas Joule encontram-se essencialmente no estator e o rendimento da máquina também melhora relativamente comparado à máquina assíncrona. Os ímãs de terras raras têm sido utilizados em muitas aplicações onde as exigências de torque, rendimento e confiabilidade são críticas. Boa parte das vantagens desses ímãs está ligada ao alto valor de densidade de fluxo constante que eles são capazes de gerar na máquina.

Os modelos comercializados de motores síncronos deste tipo não possuem ventilador incorporado, dissipando o calor diretamente pela carcaça, através da convecção natural, sendo máquinas muito compactas e de peso reduzido. As suas principais desvantagens comparativamente aos motores assíncronos decorrem do custo mais elevado e da dificuldade, na maioria dos modelos, em provocar enfraquecimento de campo de modo a conseguir exceder a velocidade nominal. O controle deste tipo de máquina requer sempre a presença de um sensor de posição, por exemplo um resolver ou encoder. As suas principais aplicações encontram-se em servo-sistemas de grande exigência dinâmica, como é o caso dos robôs e de certas máquinas ferramentas.

O modelo dinâmico da parte eletromagnética de uma máquina síncrona de imãs permanentes pode ser descrito pelas seguintes equações diferenciais, com as variáveis referidas a um referencial *dq*, onde o eixo *d* está alinhado com o fasor de fluxo imposto no rotor e *q* está avançado de *90°*.

$$u_d = R \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega_r \cdot L_q \cdot i_q \qquad (3)$$

$$u_q = R \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega_r \cdot L_d \cdot i_d + \omega_r \cdot \Phi_f \qquad (4)$$

Onde:

- ϕ_f [wb] representa a amplitude do fluxo de excitação criado pelos ímãs;
- ω_r [rad/s] a velocidade angular elétrica do rotor;
- R [ohm] a resistência do estator por fase;
- L_d [H] e L_q [H] simbolizam as auto-induções totais, por fase, medidas com o eixo do enrolamento da fase alinhado com o eixo do rotor, ou em quadratura com ele;
- d e q correspondem à projeção dos fasores das grandezas nos eixos direto e em quadratura respectivamente.

Neste modelamento é suposto que os enrolamentos do estator têm estrutura senoidal; quanto à distribuição periférica de força magnetomotriz criada pelo rotor, embora seja aproximadamente retangular, considera-se apenas o efeito da sua componente harmônica fundamental.

Os materiais usados como ímãs permanentes (ferrites cerâmicas, As-Co e Nd-Fe-Bo) apresentam grande resistividade elétrica, os enrolamentos amortecedores normalmente ausentes neste tipo de máquina, logo, não há correntes induzidas no rotor. Os imãs eqüivalem a eletroímãs que impõem uma força magnetomotriz fixa elevada; mas apresentam permeabilidade magnética muito baixa (idêntica à do ar) e, por conseguinte, as reatâncias de magnetização vistas do estator apresentam valor muito baixo. Admitindo que existem pólos salientes no rotor, implica que $Ld \neq Lq$, e que o enrolamento de cada fase do estator apresenta npp pares de pólos, o binário motor vem dado por:

$$T_e = n_{pp} \cdot \left[\Phi_f \cdot i_q + \left(L_d - L_q \right) \cdot i_d \cdot i_q \right] \qquad (5)$$

A parcela $n_{pp}.(L_d\text{-}L_q).i_d.i_q$ é devida ao efeito de saliência. Freqüentemente esse efeito é pouco significativo e, por isso, desprezado, ficando apenas a parte que resulta do produto externo dos vetores de fluxo e corrente:

$$T_e = n_{pp} \cdot \Phi_f \cdot i_q \qquad (6)$$

Montando três bobinas independentes, defasadas de $120°$ no espaço, e fazendo que cada uma delas seja percorrida por correntes elétricas, defasadas de $120°$ no tempo, tem-se como resultante um campo magnético girante. As correntes trifásicas em circuitos equilibrados são defasadas $120°$ no tempo, e podem ser representadas matematicamente pelas equações a seguir. Uma solução óbvia que permite realizar o controle de torque neste tipo de máquina requer o conhecimento, em cada instante, da localização angular (θ) do vetor de fluxo, e consiste em injetar a corrente em quadratura necessária para produzir a desejada componente de torque i_q^* determina-se pela transformação:

$$i_1^* = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_q^* \cdot \text{sen}(\theta)$$

$$i_2^* = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_q^* \cdot \text{sen}(\theta - \gamma), \qquad \gamma = \frac{2\pi}{3} \qquad (7)$$

$$i_3^* = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_q^* \cdot \text{sen}(\theta + \gamma)$$

Uma vez que o vetor de fluxo é fixo com o rotor, a localização do vetor de fluxo, ou seja, do referencial d_q, não oferece dificuldade. A figura (2) esquematiza os pormenores fundamentais desta técnica de controle de torque. Outras malhas, como por exemplo, a de controle de velocidade, são projetadas de modo análogo ao usado para as máquinas de corrente contínua. A fonte de corrente, pode ser implementada com um conversor de tensão controlado em corrente.

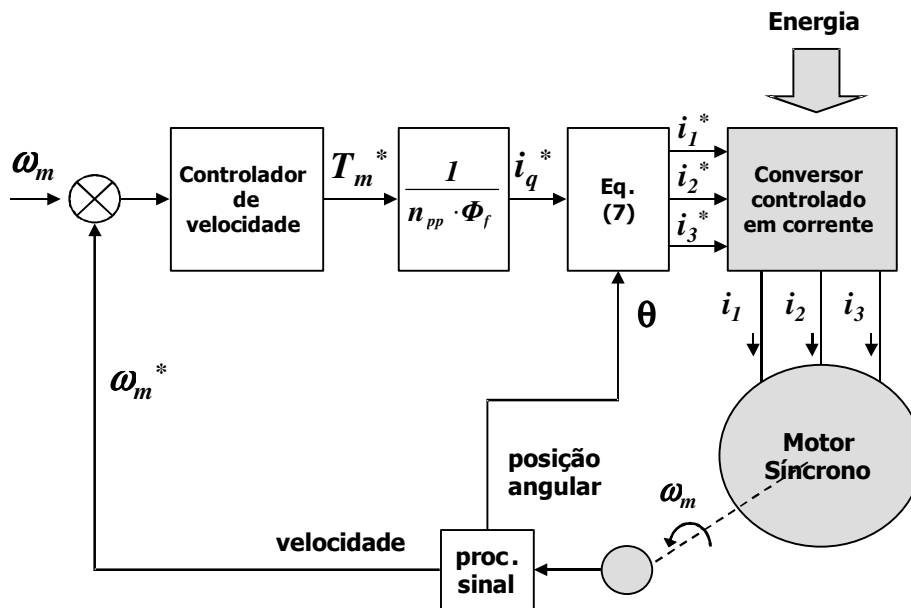



Figura 2 – Diagrama de blocos do servoacionamento.

Vê-se pelo esquema que, neste tipo de máquina, as correntes estatóricas podem ser usadas exclusivamente para produzir torque. No caso da máquina de indução, parte dessas correntes tem de ser necessariamente despendida para criar o fluxo.

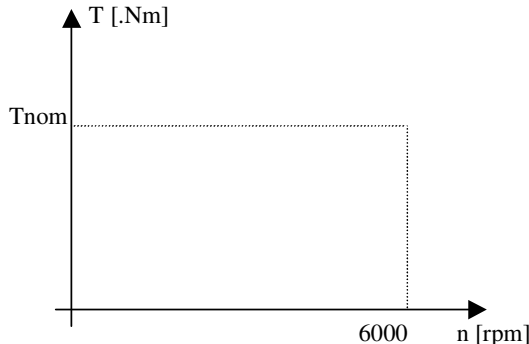
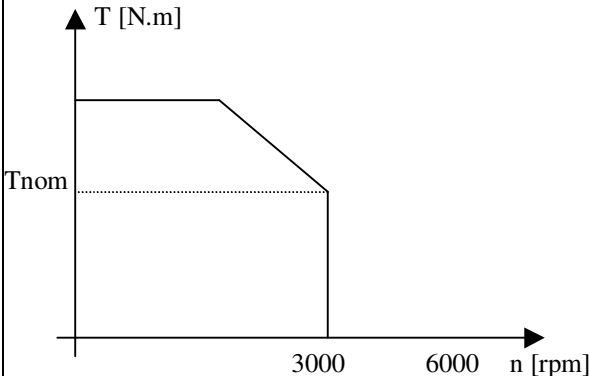
Os servomotores CA, muito embora sejam mais difíceis de controlar, pois, seus modelos matemáticos são não lineares, fortemente acoplados e multi-variáveis, apresentam vantagens significantes relativamente aos motores CC. Na tabela (1) mostra um comparativo entre os servoacionamentos *CA* e *CC,* com suas vantagens e desvantagens*:*

Servomotor *CA*	**Servomotor *CC***
Enrolamento no estator	Enrolamento no rotor
Imãs permanentes no rotor	Imãs permanentes no estator
Imãs permanetes de *Samário – Cobalto* (terras raras)	Imãs permanentes de ferrite (diferença do motor *CC* convencional)
Melhor dissipação térmica (pela carcaça)	Retirada de calor do rotor dificultada
Comutação eletrônica (no servoconversor por transistores)	Comutação mecânica (por escovas e coletor) – faiscamento/manutenção
Velocidade até *6000 rpm*	Velocidade até *3000 rpm* (faiscamento/força centrífuga)
Manutenção reduzida	Manutenção das escovas
Motor lacrado: a prova de explosão, óleo e poeira	Escovas intercambiáveis
Menor relação peso/potência	Baixa relação peso/potência
Comprimento: *70%* do *CC*	
Baixo momento de inércia	Momento de inércia *10 X* maior
Realimentação por resolver (velocidade, posição do eixo)	Realimentação por tacogerador (velocidade) e encoder (posição)
Torque: constante em toda a faixa de operação T [.Nm] Tnom 6000 n [rpm]	Queda de torque em rotações elevadas. T [N.m] Tnom 3000 6000 n [rpm]
Sobrecarga: *2* a *5 X* o torque nominal	Sobrecarga: *2 X* o torque nominal

Tabela 1 – Comparação *CA x CC.*

A seguir são apresentados curvas torque x velocidade de um servomotor DC versus servomotor brushless (ver figura 3). O motor brushless para velocidades altas permanece com o torque constante comparado com o servomotor DC. Estas são algumas vantagens da comutação eletrônica versus a comutação mecânica que resulta em uma performance superior e baixa manutenção.

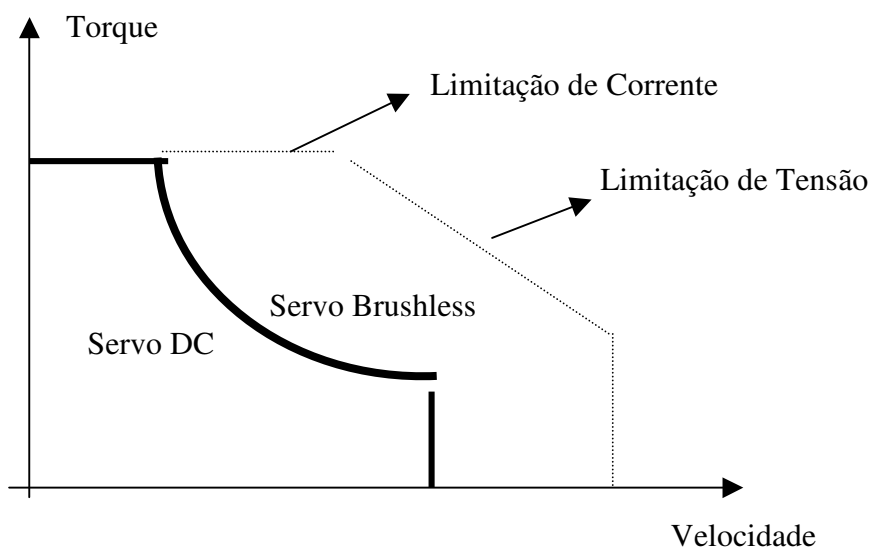



Figura 3 – Curvas torque x velocidade dos servomotores brushless e DC.

Obviamente o motor não tem uma capacidade ilimitada de fornecer conjugado eletromagnético. O maior conjugado que o motor pode fornecer está limitado pela máxima potência que pode ser cedida antes da perda de sincronismo do rotor. Por outro lado, este valor máximo de potência eletromagnética, é função particular do grau de corrente de excitação que está sendo introduzida nos enrolamentos de campo.

A forma construtiva, a grande robustez eletromecânica, o baixo custo de fabricação e manutenção são fatores que os tornam atrativos para o setor industrial. As aplicações atuais em robótica, máquinas ferramentas e outras, requerem respostas rápidas e precisas e pequena sensibilidade a perturbações internas ou externas. Buscando desenvolver controladores que agreguem as características requeridas pelas aplicações, algumas técnicas avançadas de controle foram desenvolvidas, visando dar aos motores CA as características operacionais das máquinas CC.

O estabelecimento da teoria do controle vetorial, no início dos anos setenta, proporcionaram a utilização dos motores CA, em aplicações de elevada exigência do ponto de vista do controle. Apesar de, nos dias atuais, ser a tecnologia mais aplicada na indústria, outras técnicas têm sido aliadas ao controle vetorial, na busca da melhora da robustez às perturbações internas e externas, como é o caso da utilização da técnica de controle adaptativo.

A técnica de controle vetorial usada nas máquinas síncronas a ímãs permanentes tem por objetivo separa a componente de torque da corrente da componente de fluxo, com a vantagem de que esse controle não provoca oscilações de torque.

4.2.4 *CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS*

Os servomotores *Weg* são do tipo síncrono *brushless*, e se compõe de:

- um estator bobinado com enrolamento trifásico;
- um rotor cilíndrico com ímãs permanentes;
- um sensor de posição absoluto do eixo do motor.

Com a mudança dos parâmetros dos enrolamentos, é possível otimizar o acoplamento entre módulos eletrônicos e motores, em função da velocidade e potência requeridas. Como a perda (calor) do motor está localizada unicamente no estator que, por sua vez, está em contato com a carcaça, a dissipação do calor para o meio ambiente é facilitada. A escolha do tipo de ímã (terras raras) e do seu método de montagem influi de modo predominante nas dimensões, nas características de serviço e no custo da máquina elétrica, de modo a torná-lo um elemento de qualificação.

Os ímãs de terras raras têm características magnéticas notáveis, mas de custo elevado devido a uma limitada disponibilidade mundial de matéria-prima que os compõe. Com a sua utilização pode-se minimizar todas as dimensões da máquina, especialmente o momento de inércia. Por isso, os servomotores com imãs de terras raras são justificáveis naquelas aplicações onde necessitam das seguintes características:

- alta velocidade de resposta;
- alto rendimento;
- máxima compacticidade;
- máxima confiabilidade.

Atualmente os ímãs permanentes usados pela *Weg* na construção do rotor do servomotor são compostos de *ferro, neodímio* e *boro.* Onde o *samário* e o *neodímio* são os elementos terra rara, estes ímãs são anisotrópicos. O principal inconveniente reside na baixa temperatura de *Curie* (aprox. *350 °C*), que limita seu emprego, temperaturas não superiores a *100 °C.*

No que se refere à construção dos rotores, o maior problema consiste na ancoragem dos ímãs. Para isto são utilizados bandagens de fibra de vidro envolvendo os ímãs, protegendo-os contra "deslocamento", principalmente nas altas velocidades.

O sensor de posição (resolver) deve ser projetado em função da sua montagem no interior do motor com o qual compartilha folgas, vibrações e temperatura. Deve ser robusto a:

- Perturbação elétrica provocada pela proximidade dos enrolamentos do motor;
- Funcionar à freqüência suficientemente elevada para não limitar as características dinâmicas de serviço;
- Conviver com a expansão térmica do eixo do motor, bastante importante em motores médios e grandes.

4.2.4.1 *CONTROLE ELETRÔNICO*

Em princípio é possível controlar o torque e a velocidade de todos os motores brushless com qualquer acionamento *CC* aplicado a matriz de chaves eletrônicas do motor. Logo, todos os acionamentos brushless devem utilizar algum método apto a estabilizar o torque e a garantir a rotação uniforme do motor. De acordo com a solução escolhida, os sistemas hoje existentes podem dividir-se em três categorias:

- Motor com f.e.m. trapezoidal e inversor de seis pulsos;

- Motor com f.e.m. senoidal, inversor de seis pulsos e estabilização por *"feedback"* e/ou *"feedforward"*;
- Motor com f.e.m. senoidal e inversor senoidal.

Os acionamentos com f.e.m. senoidal e inversor senoidal representam a solução que conceitualmente garante a máxima uniformidade de rotação em qualquer velocidade, mesmo com circuito aberto. Este é o método utilizado nos servomotores *Weg*. Segundo esta técnica, o motor vem acoplado a um inversor *PWM* senoidal, de amplitude, freqüência e fase controláveis independentemente. O motor é dotado de um sensor de posição de precisão do rotor, com elevada resolução.

4.2.4.2 *RESOLVER*

São transdutores rotativos projetados de modo que o coeficiente de acoplamento entre rotor e estator varie com o ângulo do eixo. Enrolamentos fixos são alojados sobre um pacote de chapas laminadas, formando o estator, e os enrolamentos móveis são alojados sobre um pacote de chapas laminadas para formar o rotor. Os enrolamentos estão posicionados em ângulos retos (*90°*), uns em relação aos outros. Quando um enrolamento do rotor é excitado com um sinal de referência *CA*, os enrolamentos do estator produzem uma saída de tensão *CA* que varia em amplitude conforme o seno e o coseno da posição do eixo.

Entre os dispositivos mais comumente usados para fornecer a realimentação de posição em motores síncronos de imãs permanentes encontra-se o Resolver. Uma das vantagens principais é que a leitura da posição é de forma absoluta bem como a robustez, já que este tem características construtivas similares ao motor.

O resolver usado em servomotores apresenta uma estrutura básica conforme a apresentada na figura (4). Um sinal de alta freqüência é transferido do rotor através de um transformador circular. No estator são gerados então sinais *CA* de alta freqüência, modulados pelo seno e coseno do ângulo do rotor. Este sinal, não é muito útil em sua forma original, desta forma um circuito externo se faz necessário para criar valores utilizáveis à nível do controle. O sinal deve na realidade ser tratado para que possa então fornecer um valor de posição absoluta (este tratamento do sinais é feito através de conversores digitais, usualmente já incorporados aos circuitos eletrônicos do servoconversor) e um sinal analógico de velocidade (ver figura 5).

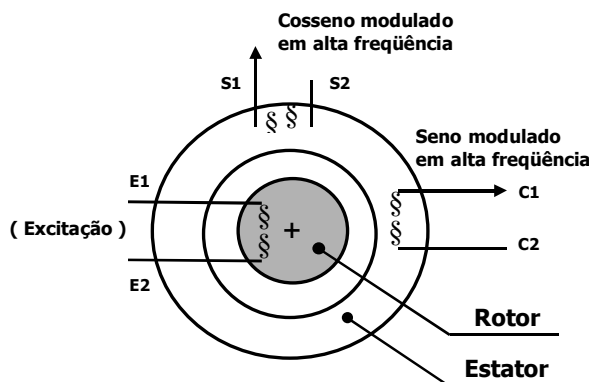



Figura 4 – Estrutura básica do resolver.

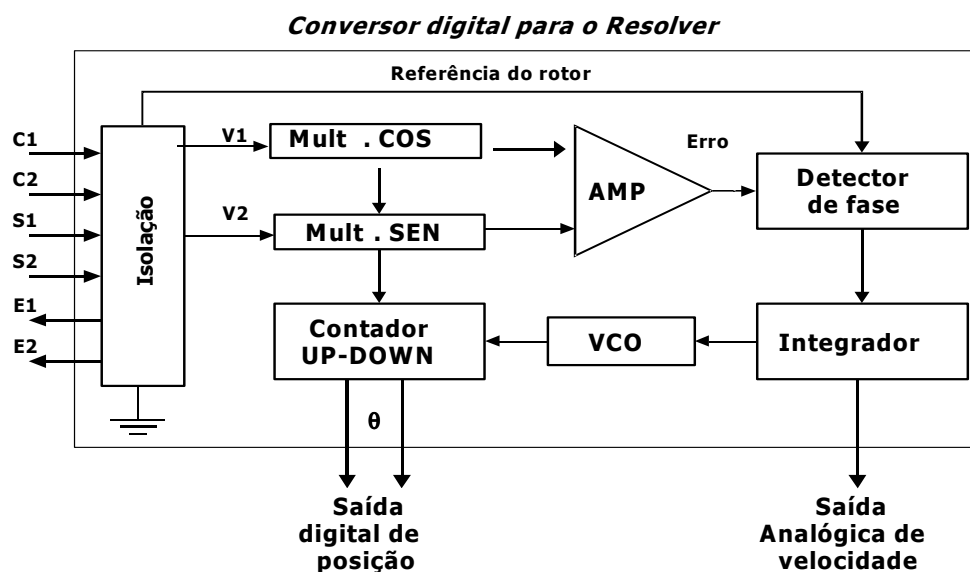



Figura 5 – Conversor digital do resolver.

As referências de posição utilizadas nestes sistemas de conversão não são padronizados, ficando a critério de cada fabricante a escolha de um referencial que mais lhe convenha e que obviamente esteja vinculado ao projeto do seu servoconversor.

4.2.4.3 *CIRCUITO MAGNÉTICO*

O circuito magnético é constituído por um núcleo de chapas de aço de pequena espessura. Este tipo de montagem é exigido para minimizar as perdas por correntes parasitas, ou correntes de *Foucault* que surgiriam caso o núcleo fosse maciço.

A clara compreensão do princípio de funcionamento do transformador é de muita importância para o pleno entendimento do motor de indução, que é uma máquina rotativa. O campo girante, com densidade de fluxo *B* constante, promove indução numa bobina, da mesma forma que um campo unidirecional, com variação da densidade de fluxo *B* com o tempo (ver figura 6).

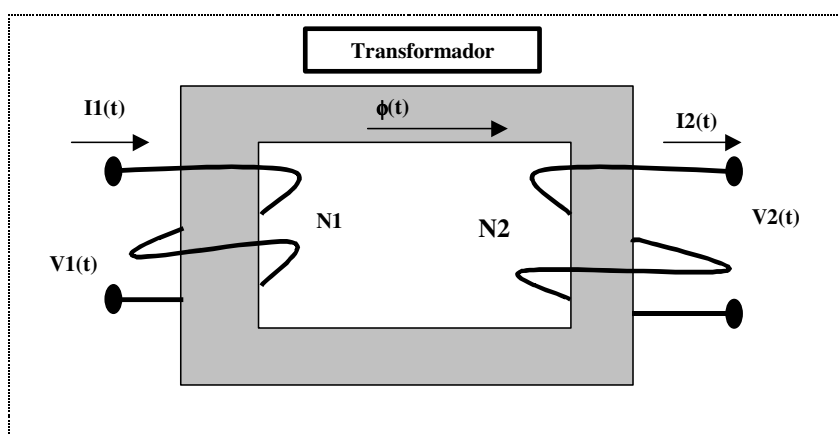



Figura 6– Transformador ideal.

Num motor de indução, por exemplo, o campo girante é produzido pelas bobinas do enrolamento do estator, e o fluxo magnético atravessa as bobinas do rotor. Neste sentido, o estator do motor comporta-se como o primário de um transformador, e o rotor como um secundário rotativo. Além da tensão e da corrente, há alteração da freqüência devido à rotação (ver figura 7).

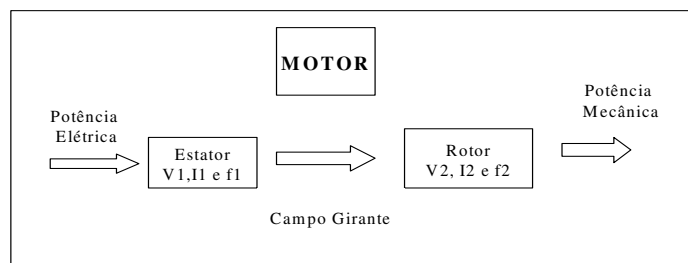



Figura 7 – Analogia do transformador com o motor.

A grosso modo, o motor de indução assíncrono nada mais é que um transformador com o secundário rotativo, no qual a tensão e a corrente induzidas estão numa freqüência diferente do primário. Esta condição é essencial para o desenvolvimento da ação motriz.O estator é uma parte estática do motor de indução, constituído por um núcleo de chapas finas de aço magnético, tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas por correntes parasitas e por histerese. Essas chapas têm a forma de um anel com ranhuras internas, e servem para acomodar os conjuntos de bobinas, ou simplesmente enrolamentos, que irão criar o campo girante. As bobinas localizadas nas ranhuras do estator recebem a potência elétrica diretamente da rede, à semelhança do primário de um transformador.

Inserido no interior do estator encontra-se o rotor, igualmente constituído por um núcleo de chapas magnéticas quase sempre com as mesmas características das chapas do estator. Essas chapas são ranhuradas externamente para acomodar as bobinas do rotor, ou mais comumente as barras que fazem o papel das bobinas, no caso de rotor de gaiola. Como haverá indução nas bobinas, ou nas barras do rotor, ele se comporta como um secundário rotativo de um transformador.

Montando três bobinas independentes, defasadas de $120°$ no espaço, e fazendo que cada uma delas seja percorrida por correntes elétricas, defasadas de $120°$ no tempo, tem-se como resultante um campo magnético girante. As correntes trifásicas em circuitos equilibrados são defasadas $120°$ no tempo.

Os grupos com mais de uma bobina são montadas na forma concêntrica ou imbricadas (ver figura 8). Num grupo de bobinas concêntricas, uma está no interior da outra. Cada bobina tem seu próprio passo, isto é, distância entre ambos os lados. As cabeças das bobinas não se cruzam. No grupo de bobinas imbricadas, todas têm o mesmo passo. As cabeças das bobinas (ver figura 9) são sobrepostas, isto é, se cruzam.

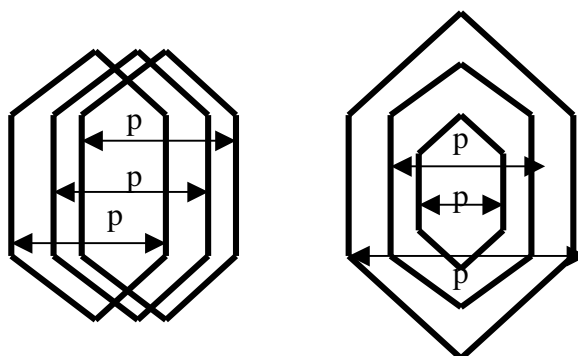



Figura 8 - Representação esquemática de grupo de bobinas. a) imbricadas (passo das bobinas constantes); b) concêntricas (passo das bobinas diferentes).

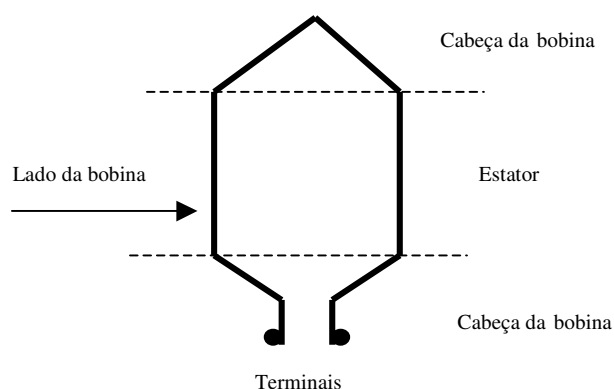



Figura 9 – Características da bobina.

Os servomotores da *Weg* possuem bobinas imbricadas, a carcaça *56* têm *24* ranhuras e a carcaça *71* possui *36* ranhuras.

O fato de a simples inversão de duas fases inverter o sentido de rotação do campo girante, atribui uma característica singular ao motor de indução. Para ele, tanto faz girar no sentido horário como no anti-horário. Nada impede que o motor altere o sentido de sua rotação numa operação; basta que uma simples chave faça a inversão de fases. Em algumas aplicações, isto se reveste de enorme importância.

Os motores elétricos a ímãs permanentes apresentam várias configurações quanto ao circuito magnético. Estas configurações podem ser classificadas de acordo com os métodos de comutação (com escovas ou sem escovas), projeto do enrolamento da armadura (com ranhuras ou sem ranhuras), tipo de indução no entreferro (senoidal ou trapezoidal), disposição dos ímãs (no rotor ou estator) e tipo dos ímãs (cerâmicos, ligas metálicas ou terras raras). A escolha é determinada principalmente pela aplicação. O projeto de tais motores deve satisfazer exigências específicas como:

- Potência e conjugado de saída;
- Relação torque/inércia;
- Constantes de tempo elétrica e mecânica;
- Estabilidade térmica;
- Capacidade de suportar correntes de pico.

O servomotor opera em condições severas de carga, com grande número de partidas, variações de carga, inversões do sentido de rotação e variação da rotação.

4.2.4.4 *ASPECTOS CONSTRUTIVOS IMPORTANTES PARA A CONTROLABILIDADE DO FLUXO*

A controlabilidade do fluxo está associada à relação entre o fluxo do eixo direto e a corrente da máquina, pois é neste eixo onde a maior parte do fluxo do ímã se impõe. Quanto mais próxima da unidade for esta relação, maior a controlabilidade do fluxo na faixa de velocidade desejada.

Os ímãs de terras raras normalmente utilizados em máquinas com ímãs permanentes possuem baixa permeabilidade (próxima a do ar). Assim, eles não só produzem altas induções como dificultam a passagem de fluxo produzido por outras fontes, facilitando o controle do fluxo resultante.

4.2.4.5 *ASPECTOS TÉRMICOS*

O calor é uma forma de energia que, no caso do motor elétrico, não é aproveitada para produzir trabalho mecânico. O ponto de maior temperatura localiza-se no interior da ranhura. A norma *NBR 7034* estabelece classes de isolamento que dependem do tipo de material isolante empregado e dos sistemas de isolamento. Para cada classe é estabelecido um limite de temperatura que o isolamento pode suportar sem que seja afetada sua vida útil. As classes são as seguintes:

- Classe *A* ➔ *105 °C;*
- Classe *E* ➔ *120 °C*;
- Classe *B* ➔ *130 °C;*
- Classe *F* ➔ *155 °C;*
- Classe *H* ➔ *180 °C.*

A distribuição de temperatura para essas classes é dada pela tabela (2). Os servomotores da *Weg* são da classe *H*.

Classe de Isolamento	*B*	*F*	*H*
Temperatura Ambiente	*40*	*40*	*40*
Elevação de Temperatura	*80*	*105*	*125*
Dif. Temp. Máx. e Méd.	*10*	*10*	*15*
Temperatura Limite	*130*	*155*	*180*

Tabela 2 – Classe de Isolamento.

Para uma adequada proteção dos motores utilizam-se sensores térmicos inseridos nas cabeças das bobinas. Os mais comumente utilizados são termistores, termoresistores, termostatos e protetores térmicos. Se a temperatura do enrolamento ultrapassar um valor pré-ajustado, os

sensores enviam sinais ao circuito de comando, e então, ou se desliga o motor, ou acionam-se alarmes.

4.3 ENCODERS

Podemos definir este equipamento como sendo um transdutor que executa a transformação (decodificação) de um movimento mecânico em um sinal eletrônico. Seu funcionamento está baseado na interrupção ou não de um sinal óptico, normalmente um feixe luminoso, conseguido comumente através de um emissor e um sensor separados por um nônio e um disco de vidro, plástico ou metal estriados que alternadamente permitem ou não a passagem de luz do emissor para o receptor. Quando o disco sofre um deslocamento angular interrompe a passagem de luz, gerando um pulso. Este pulso representa um certo ângulo mínimo, que define a resolução do sistema. Podemos dividir estes equipamentos em dois tipos:

- encoders incrementais;
- encoders absolutos.

4.3.1 *ENCODER ABSOLUTO*

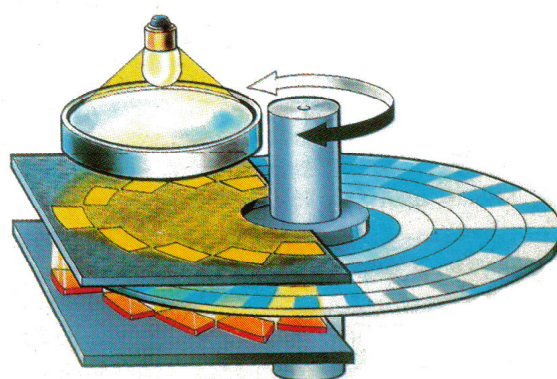
Em um encoder absoluto cada posição é representada unicamente por um código padrão. Este código provem de trilhas independentes e está gravado no disco do encoder, onde para cada trilha existe um sensor óptico correspondente. Cada sensor irá fornecer um sinal de nível lógico *"1"* ou *"0"* dependente do código padrão do disco para cada posição (ver figura 10). Um vantagem deste tipo de encoder é que não haverá a perda da posição no caso de falta de energia, pois não é necessário indexar ou referenciar a partir de um determinado ponto.

Princ pio de medi o de um enconder absoluto

Figura 10 – Detalhes do encoder absoluto.

Cada trilha do disco codificado significa um *bit,* dependendo então do número de trilhas verificaremos a resolução deste sistema. Por exemplo, um disco com *8* trilhas poderá identificar 256 posições diferentes. A expressão (8) mostra analiticamente como podemos determinar a resolução de um encoder absoluto em função do número de bits do disco codificado.

$$\Delta\theta = \frac{360^o}{2^N} \qquad (8)$$

Onde: N é o número de bits ou trilhas do disco.

O disco do encoder pode ser codificado de várias maneiras diferentes, porém, existem dois códigos que são os mais utilizados: o código binário e o código de *Gray.* O código binário é amplamente utilizado nas aplicações para automação industrial e o código de *Gray,* possui como principal vantagem a que de uma posição para outra apenas um *bit* é alterado. Assim, fica possível encontrar erros provocados por ruídos elétricos ou eletromagnéticos através de software.

Podemos ainda, dividir os encoders absolutos em dois tipos: *single turn* e *multi turn.* Os encoders do tipo *single turn* repetem o código da posição a cada *360°* para uma volta do eixo. Normalmente estes encoders são fornecidos até a resolução de *14 bits,* ou seja, *16384* posições por volta, ou ainda, o menor ângulo que pode ser representado é o de *0,0219°*. Já os do tipo *multi turn* possuem discos codificados adicionais que permitem a leitura de várias voltas. A figura 11 pode nos dar uma idéia de como isto é realizado.

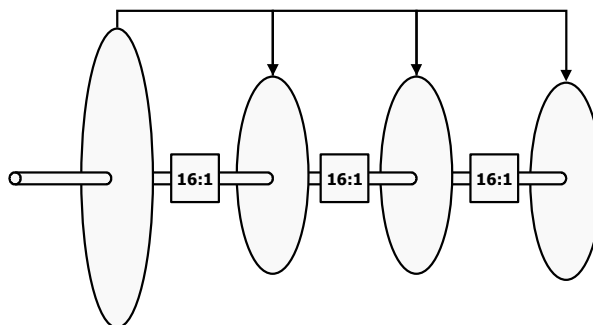



Figura 11 – Encoder absoluto multi turn.

Com relação a saída destes encoders podemos encontrar: saída paralela, saída serial ou comunicação em rede. Para os encoders com saída paralela, para cada *bit* existe um condutor, e o elemento de controle deverá obviamente possuir uma porta paralela para leitura destes sinais. Os encoders com saída serial são muito utilizados pois a grande maioria dos processadores no mercado utilizam este sistema de transmissão de dados. Existem algumas vantagens, dentre as quais:

- baixo custo em função do cabeamento;
- maior velocidade de transmissão (até *1,5 G bps*);
- reduzido número de componentes;
- maior imunidade a ruídos.

Os encoders com saída para comunicação em rede também são seriais, porém adotam protocolos amplamente conhecidos no mercado de automação, com por exemplo: *CAN (Devicenet), Interbus, Profibus (DP)* e entre outros.

As aplicações para este tipo de encoder seriam aquelas onde necessitamos fazer posicionamentos em um única volta e que podem permanecer desativadas por um longo período de tempo, tais como:

- Radares;
- Telescópios;
- Guindastes;
- Manipuladores;
- Robôs;
- Comportas;
- Sistemas de nível;
- Posicionamento de eixos;
- Posicionamento de válvulas;
- Mesas planas, etc.

4.3.2 *ENCODER INCREMENTAL*

Nestes encoders cada deslocamento angular é representado pela geração de um pulso. É possível ainda determinar o sentido de rotação do eixo através do nônio ou de duas faixas regularmente defasadas (ver figura 12). Na verdade um circuito eletrônico poderá detectar o sentido de giro através de operações lógicas.

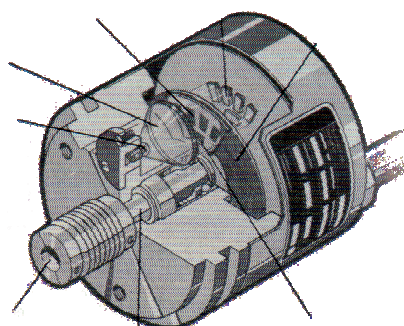



Figura 12 – Detalhes do encoder incremental.

A resolução é determinada através do número de pulsos que o encoder gera por volta ou pelo número de pulsos por rotação (*PPR*). A máxima resolução que encontramos para estes casos está por volta de *10000 pulsos/rotação* (podendo chegar a *40000* com alguns recursos adicionais), pois acima disto fica muito difícil construir ranhuras tão próximas umas das outras. O que não devemos nunca esquecer é que a resolução do encoder deve ser igual ou melhor do que aquela requerida pela aplicação.

Como todo transdutor o encoder incremental possui duas velocidades inerentes: a mecânica e a eletrônica, que por sua vez impõem limites a velocidade de operação. A combinação de vários fatores tais como, rolamentos, freqüência de resposta, *PPR* para cada aplicação, também influenciam nestas questões. De modo geral, a máxima velocidade de operação para um encoder incremental depende diretamente da aplicação. Podemos determinar a velocidade de operação para uma dada aplicação através da seguinte expressão:

$$f = \frac{PPR \times n}{60} \qquad (9)$$

Onde: *f* é a freqüência de operação [Hz];
PPR é a resolução do encoder;
n é a rotação [rpm].

Para os terminais de saída é adotada uma terminologia própria. Os sinais são transmitidos utilizando circuitos de corrente contínua, para que sejam atingidas altas velocidades de transmissão. Esta transmissão é feita por uma corrente que pode fluir do encoder para o circuito (*NPN*) ou do circuito para o encoder (*PNP*), embora a maioria dos encoders possam ser configurados em outros padrões, além do *PNP* ou *NPN*, tais como: *Push Pull, Line Drive* ou *RS-422*. Os encoders incrementais ainda podem ser unidirecionais ou bidirecionais ou ainda com sinal de referência. Adicionalmente podem ser transmitidos também como sinal singular *"sigle ended"* ou com seus sinais complementares "diferencial".

Para a especificação de encoders incrementais devem ser informadas algumas características, que podemos dividir em:

- Mecânicas: Flange, diâmetro do eixo ou eixo vazado, máxima carga do eixo, pulsos por volta, velocidade, momento de inércia, temperatura de operação, proteção *[IP]*, dimensões e tipo de conexão (elétrica).
- Eletrônicas: feqüência, tipo de eletrônica, formato da saída, imunidade a ruído, proteção do circuito (inversão de polaridade, sobretensão, curto-circuito na saída) e alimentação.

As aplicações para encoders incrementais abrangem vários processos entre os quais podemos citar:

- Realimentação de sistemas digitais de controle de velocidade;
- Máquinas de embalagens;
- Ajustes de fusos para preparação de espessura de um produto;
- Robôs;
- Misturadores;
- Mesas rotativas.

4.4 SERVOCONVERSOR

É a parte eletrônica que recebe a energia elétrica da rede ou de uma fonte, e fornece esta energia de uma forma controlada ao servoconversor, de acordo com um sinal de referência de velocidade proveniente do controlador de posição. Os tipos dos servoconversores são extremamente variados, em função do tipo do servomotor a ser acionado e da tecnologia eletrônica empregada. Mas de uma forma genérica, todos os servoconversores para máquinas-ferramenta *CNC* operam em quatro quadrantes, controlam a corrente nominal, a dinâmica, a velocidade do servomotor, permitem o controle *PI* ou *PID* da malha de velocidade e realizam a supervisão do servoacionamento.

4.5 CONCEITOS BÁSICOS

4.5.1 *CONJUGADO*

Também chamado de torque, momento ou binário é a medida do esforço necessário para girar um eixo.

$$C = F.x \qquad \text{ou} \qquad C = F.r, \qquad (10)$$

$$v = (\pi.d.\eta)/60 \qquad (11)$$

Onde: C é o conjugado [N.m];
F é a força [N];
x é a distância [m];
r é o raio da polia [m];
v é a velocidade angular [m/s];
d é o diâmetro da peça [m];
n é a velocidade [rpm].

4.5.2 *POTÊNCIA*

$$P(kw) = 0{,}736\ .\ P(cv) \qquad \text{ou} \qquad P(cv) = 1.359\ P(kw) \qquad (12)$$

4.5.3 *RELAÇÃO ENTRE CONJUGADO E POTÊNCIA*

Quando a energia mecânica é aplicada sob a forma de movimento rotativo, a potência desenvolvida depende do conjugado C e da velocidade de rotação n. As relações são:

$$P(cv) = (C(kgf.m)\ .\ n(rpm)) / 716 = (C(N.m)\ .\ n(rpm)) / 7024 \quad (13)$$

$$P(kw) = (C(kgf.m)\ .\ n(rpm)) / 974 = (C(N.m)\ .\ n(rpm)) / 9555 \quad (14)$$

Inversamente,

$$C(kgf.m) = (P(cv)\ .\ 716 / n(rpm)) = (P(kw)\ .\ 974 / n(rpm)) \qquad (15)$$

$$C(N.m) = (P(cv)\ .\ 7024 / n(rpm)) = (P(kw)\ .\ 9555 / n(rpm)) \qquad (16)$$

4.5.4 VARIAÇÃO E CONTROLE DE VELOCIDADE:

Geralmente são utilizados trens de engrenagens em servoacionamentos para reduzir a velocidade e amplificar o torque ou para obter a transferência de potência mais eficiente, ajustando o elemento acionador a uma determinada carga.

A velocidade de rotação da carga ω_2, acionada pela polia movida, pode ser diferente da velocidade de rotação do motor, que é a mesma velocidade da polia motora ω_1. A velocidade linear da correia é a mesma em qualquer ponto do conjunto, com isto tem-se:

$$v = v_1 = v_2 \qquad (17)$$

que implica na seguinte igualdade:

$$\omega_1 \cdot r_1 = \omega_2 \cdot r_2 \qquad (18)$$

Onde: r_1 o raio da polia acoplada ao motor [m];
r_2 o raio da polia acoplada a carga [m].

Devido ao atrito entre a correia e as polias, o rendimento dos acoplamento não chega a *100%,* mas quase sempre é superior a *95%.* É importante observar que a potência mecânica transmitida $Pmec_1$ *[w]* é praticamente a mesma da polia movida $Pmec_2$ *[w]*. Assim, tem-se:

$$Pmec_1 = C_1 \cdot \omega_1 \quad \text{e} \quad Pmec_2 = C_2 \cdot \omega_2, \qquad (19)$$

Desprezando as perdas, vem:

$$(C_1 / C_2) = (\omega_1 / \omega_2) = (r_1 / r_2) = i \qquad (20)$$

Onde: C_1 o conjugado do motor [N.m];
C_2 o conjugado transmitido a carga [N.m];
i relação de redução, admensional.

➔Trem de Engrenagens (motoredutores):

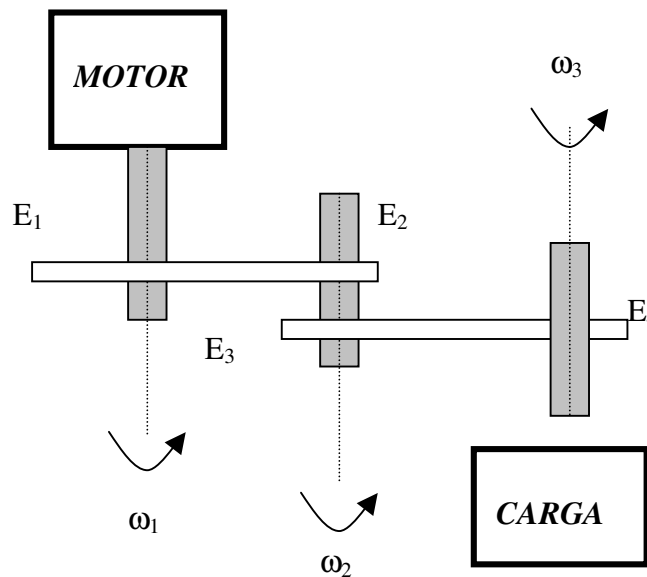



Figura 13 – Detalhes do trem de engrenagens.

As engrenagens E_2 e E_3 estão no mesmo eixo intermediário e, portanto, à mesma rotação ω_2. Assim, a velocidade do eixo intermediário será dada por:

$$\omega_2 = \omega_1 \, . \, (r_1 / r_2) \qquad (21)$$

A velocidade entre o eixo da carga e o eixo intermediário será:

$$\omega_2 \, . \, r_3 = \omega_4 \, . \, r_4, \qquad (22)$$

Logo:

$$\omega_1 \, . \, (r_1 / r_2) \, . \, r_3 = \omega_4 \, . \, r_4 \qquad (23)$$

$$\omega_4 = \omega_1 \, . \, (r_1 / r_2) \, . \, (r_3 / r_4) \qquad (24)$$

Desprezando as perdas mecânicas do acoplamento, tem-se que as potências mecânicas do motor e da carga são as mesmas. Assim:

$$Pm = Cm \, . \, \omega_1 \quad \text{e} \quad Pc = Cc \, . \, \omega_4, \qquad (25)$$

$$Cc = Cm \, . \, (\omega_1 / \omega_2) = Cm. \, (r_1 / r_2) \, . \, (r_3 / r_4) \qquad (26)$$

Considerando que o redutor não é ideal e tem um rendimento η, de valor entre [0, 1], a equação (20) passa a ser:

$$[C_1 /(\eta . \, C_2)] = [\omega_1 /(\eta \, . \, \omega_2)] \qquad (27)$$

Um redutor de engrenagens tem geralmente baixo atrito e folgas desprezíveis. O rendimento costuma exceder 97% quando há um só trem de engrenagens (tipicamente $i \leq 6$), ronda os 95 % com dois trens ($6 \leq i \leq 40$) e baixa para os 90% com três trens ($i \geq 40$). Rendimento de acoplamentos (ver tabela 3):

Tipo de acoplamento	Faixa de rendimento (%)
Direto	100
Embreagem eletromagnética	87 – 98
Polia com correia plana	95 – 98
Polia com correia em V	97 – 99
Engrenagem	96 – 99
Roda dentada (correia)	97 – 98
Cardã	25 – 100
Acoplamento hidráulico	100

Tabela 03 – Faixa de rendimento dos acoplamentos.

4.5.5 *MOMENTO DE INÉRCIA*

A inércia da carga acionada é uma das características fundamentais para verificar, através do tempo de aceleração, se o motor consegue acionar a carga dentro das condições exigidas pelo ambiente ou pela estabilidade térmica do material isolante. É uma medida da resistência que um corpo oferece a uma mudança em seu movimento de rotação em torno de um dado eixo. Depende do eixo em torno do qual ele está girando e, também, da forma do corpo e da maneira como sua massa está distribuída.

O momento de inércia total do sistema é a soma dos momentos de inércia da carga e do motor.

$$Jt = Jm + Jce \qquad (28)$$

Onde: *Jt* o momento de inércia total [kg.m^2];
Jce o momento de inércia da carga referido ao eixo do motor [kg.m^2];
Jm o momento de inércia do motor [kg.m^2].

No caso de uma máquina que tem rotação diferente do motor (polias ou engrenagens), deverá ser referida a rotação nominal do motor conforme a figura (14) e a equação (29):

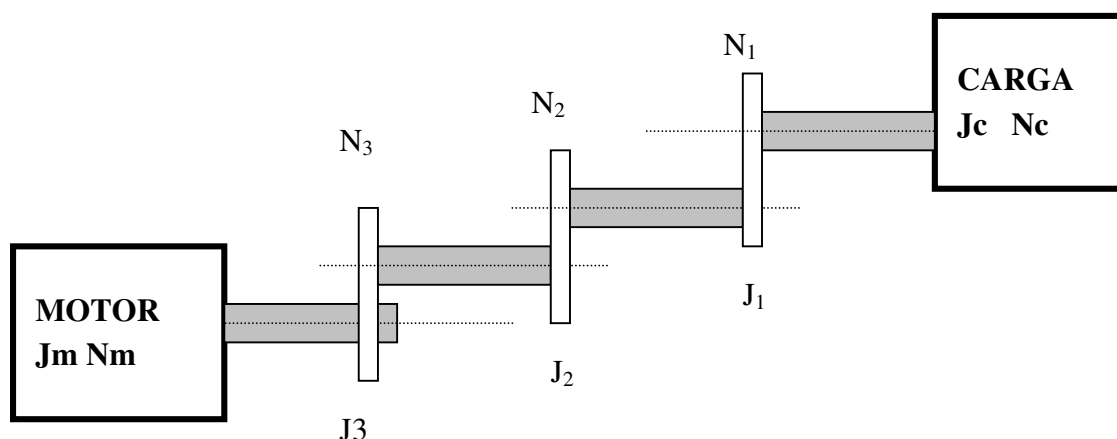



Figura 14 – Momento de inércia com velocidades diferentes.

$$Jce = Jc\,(Nc\,/\,Nm)^2 + J_1\,(N_1\,/\,Nm)^2 + J_2\,(N_2\,/\,Nm)^2 + J_3\,(N_3\,/\,Nm)^2 \quad (29)$$

Onde: *Jce* o momento de inércia da carga referido ao eixo do motor [kg.m^2];
Jc o momento de inércia da carga[kg.m^2];
Nc a rotação da carga [rad/s];
Nm a rotação do motor [rad/s].

Alguns momentos de inércia (ver tabela 4):

FORMA GEOMÉTRICA	*EQUAÇÕES*
Aro em torno do eixo do cilindro	$J = (M \, . \, R^2)$ (30)
Cilindro anular (ou anel) em torno do eixo do cilindro	$J = (M / 2) \, . \, (R_1^2 + R_2^2)$ (31)
Cilindro sólido (ou disco) em torno do eixo do cilindro	$J = (M \, . \, R^2) / 2$ (32)
Cilindro sólido (ou disco) em torno do eixo que passa pelo centro perpendicular ao seu comprimento	$J = (M \, . \, R^2) / 4 + (M \, . \, R^2) / 12$ (33)
Vareta delgada em torno do eixo que passa pelo centro perpendicular ao seu comprimento	$J = (M \, . \, L^2) / 12$ (34)
Vareta delgada em torno de um eixo que passa por uma das extremidades perpendicular ao seu comprimento	$J = (M \, . \, L^2) / 3$ (35)
Esfera sólida em torno de qualquer diâmetro	$J = (2 \, . \, M \, . \, R^2) / 5$ (36)
Casca esférica delgada em torno de qualquer diâmetro	$J = (2 \, . \, M \, . \, R^2) / 3$ (37)
Aro em torno de qualquer diâmetro	$J = (M \, . \, R^2) / 2$ (38)
Placa em torno do eixo perpendicular que passa pelo seu centro	$J = [M \, . \, (a^2 + b^2)] / 12$ (39)
Eixos paralelos	$J = Jcm + M. \, h^2$ (40)

Tabela 4 – Momentos de Inércias.

Onde:

M massa [kg];
R raio [m];
R_1 raio interno [m];
R_2 raio externo [m];
L comprimento [m];
a e b laterais da chapa [m].

4.5.6 *PERFIL DE VELOCIDADES*

- Velocidade com perfil parabólico:

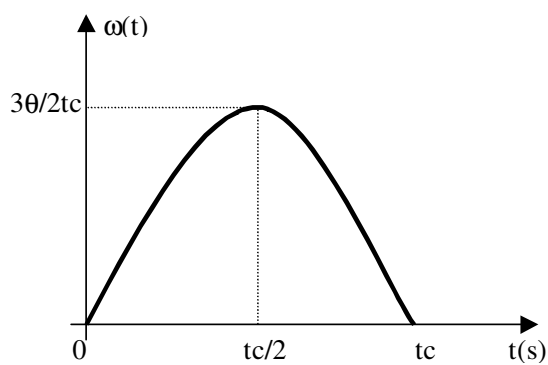



Figura – 15

- Velocidade com perfil triangular:

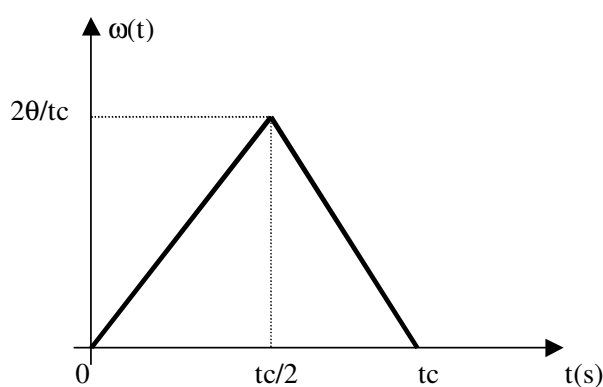



Figura – 16

- Velocidade com perfil trapezoidal:

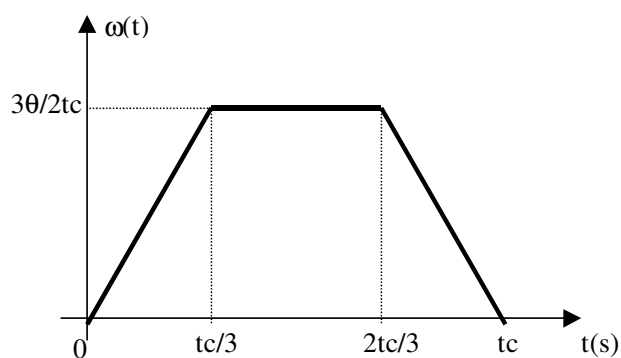



Figura – 17

4.6 APLICAÇÕES DE SERVOACIONAMENTOS

4.6.1 *ENTRADA ANALÓGICA*

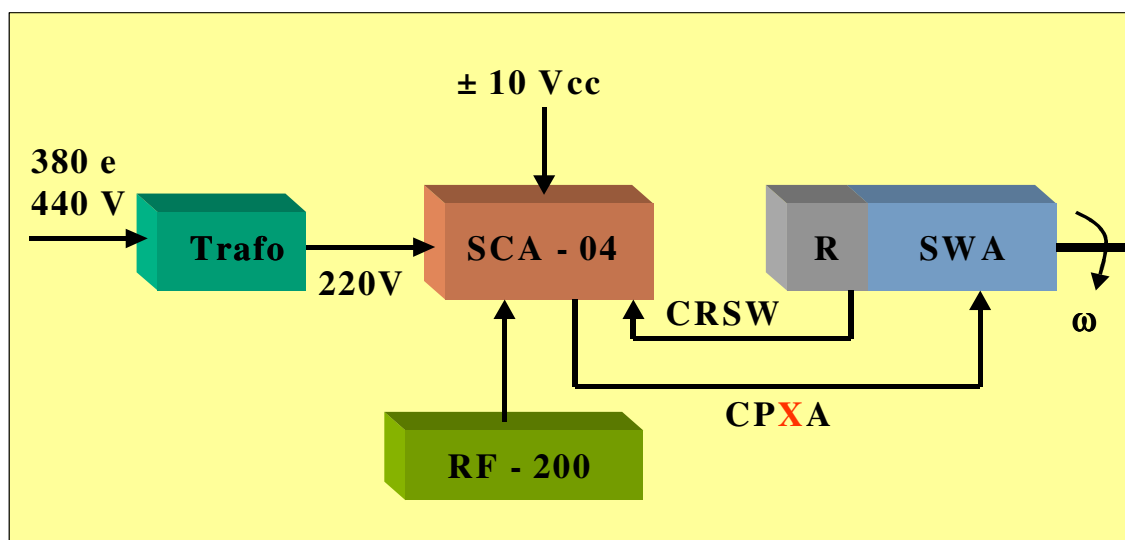



Figura - 18

4.6.2 *ENTRADAS DIGITAIS/ANALÓGICAS E SAÍDA DIGITAIS/ANALÓGICAS*

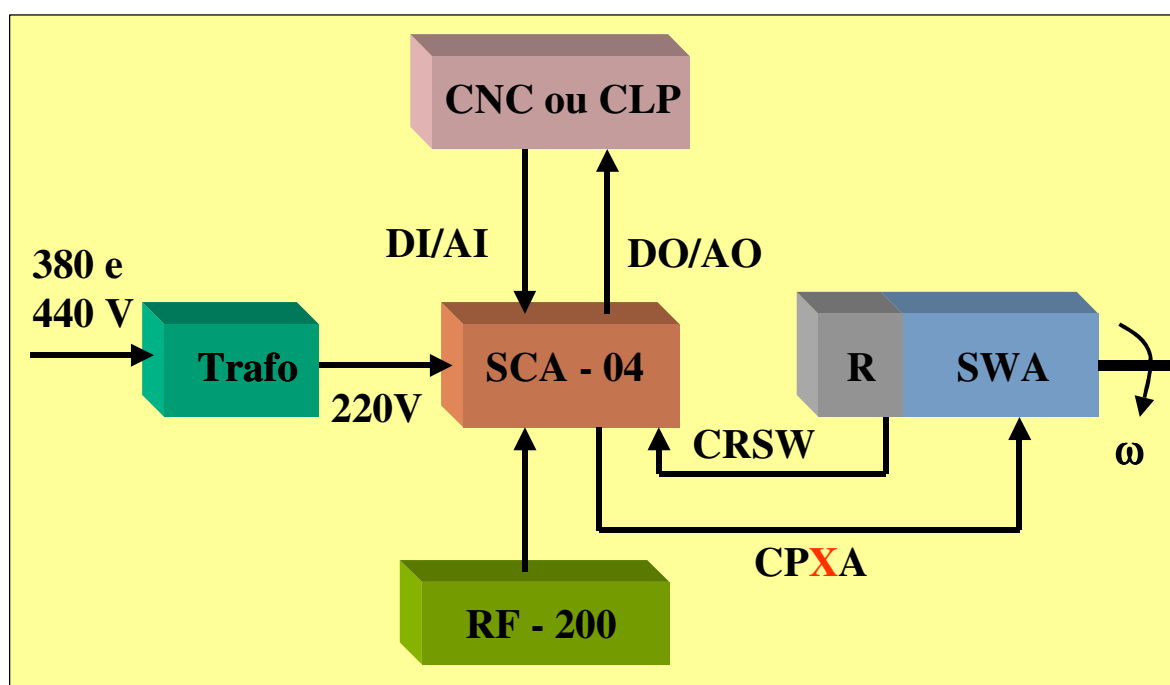



Figura - 19

4.6.3 *CONTROLE POR CNC OU CLP E ENCODER EXTERNO*

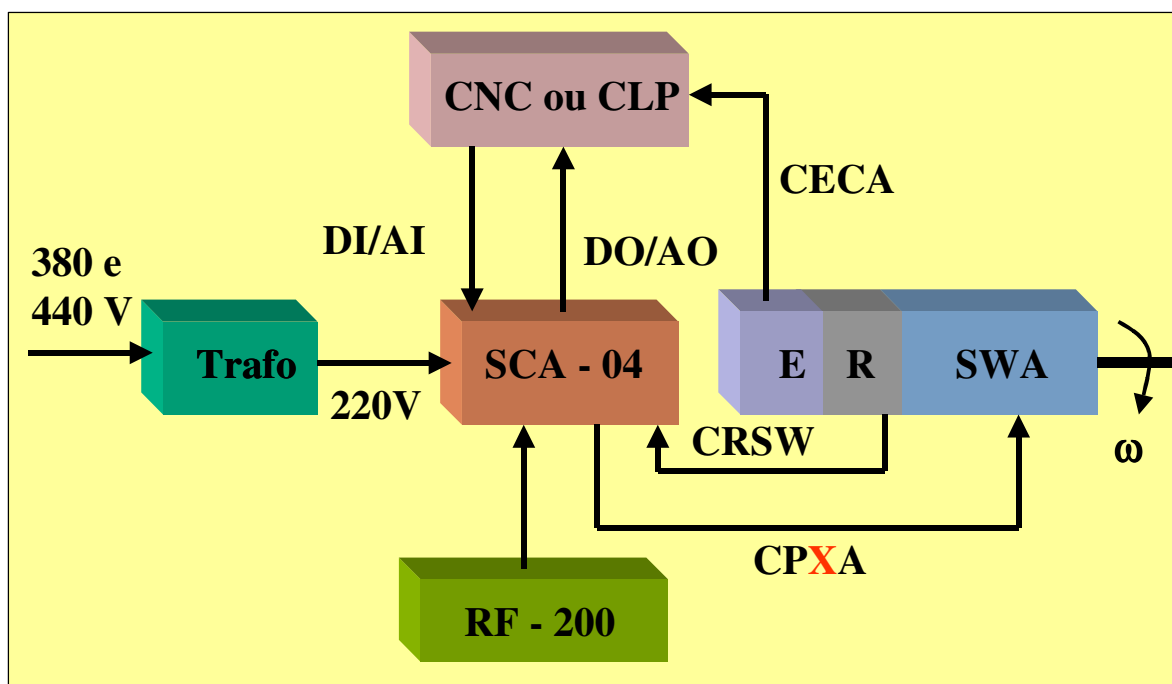



Figura – 20

4.6.4 *PLACA POSICIONADORA POS-01 E ENCODER EXTERNO*

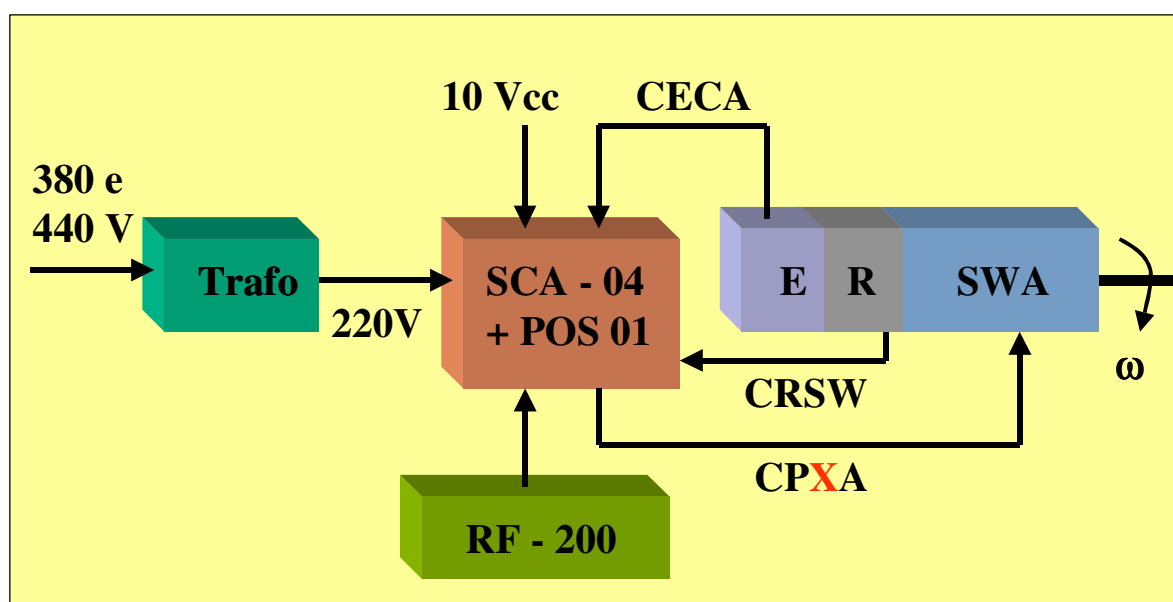



Figura - 21

4.6.5 CONTROLE COM CNC OU CLP E ENCODER EXTERNO ACOPLADO NA MÁQUINA

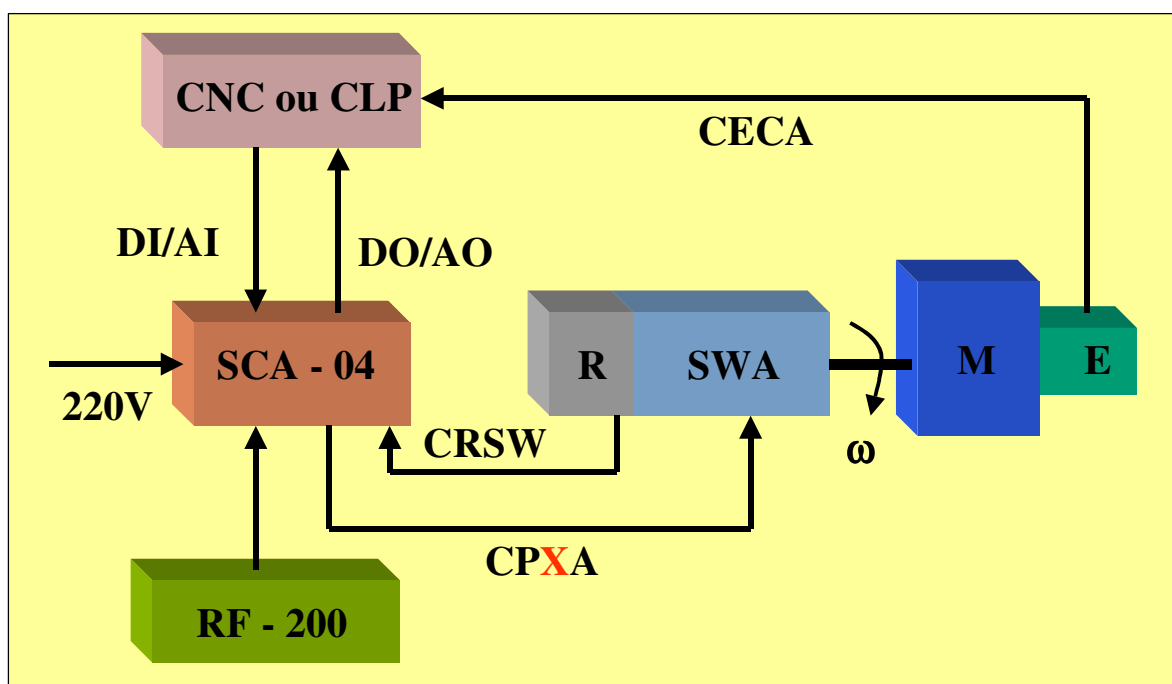



Figura - 22

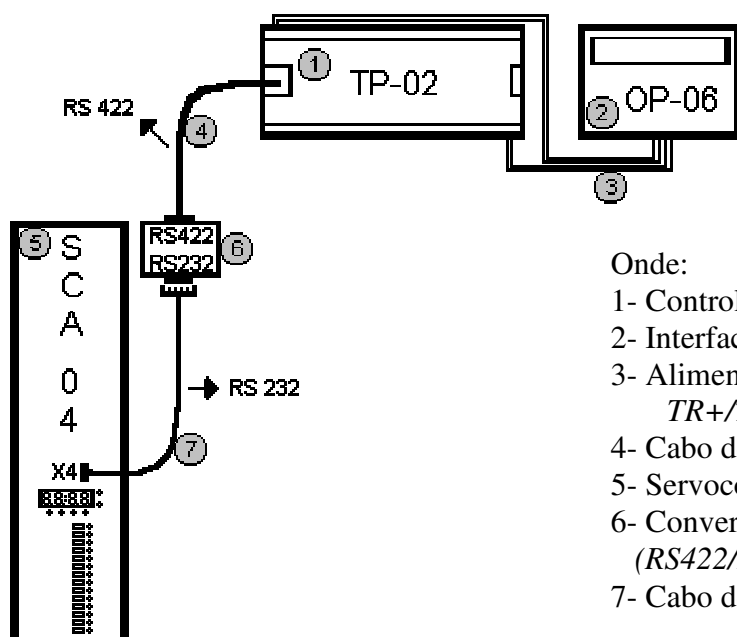
4.6.6 COMUNICAÇÃO DO SERVOCONVERSOR COM O C.L.P. (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL)

Onde:
1- Controlador Lógico Programável *TP02;*
2- Interface Homem Máquina *OP-06;*
3- Alimentação *+24Vdc* e comunicação *TR+/TR-(TP-02/OP-06);*
4- Cabo de conexão *TP-202MC;*
5- Servoconversor *SCA-04;*
6- Conversor de comunicação *TP232PG (RS422/RS232)*
7- Cabo de conexão *DB9/RJ11.*

Figura 23 – Servoconversor + CLP.

4.6.7 COMUNICAÇÕES DOS SERVOCONVERSORES COM O C.L.P. (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL)

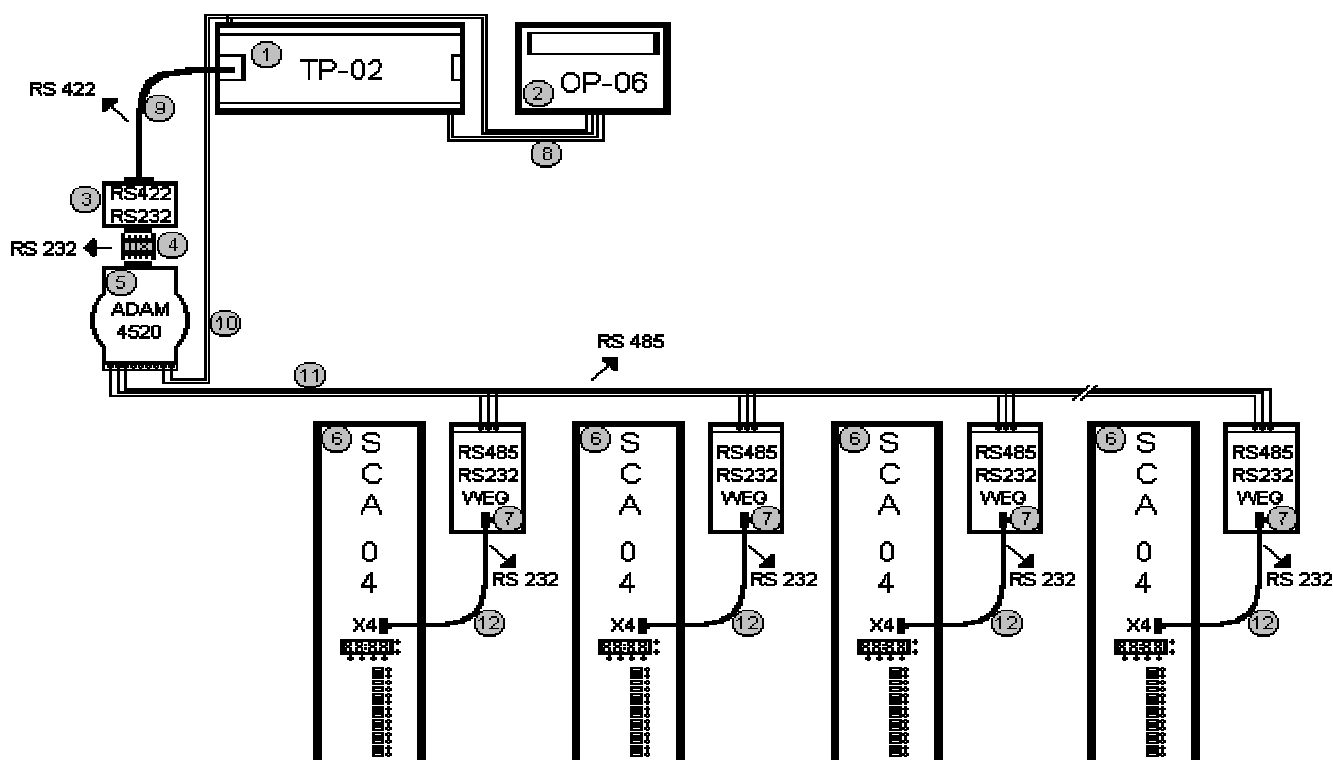



Figura 24 – Comunicação paralela de servoconversores.

Onde:

1 – Controlador Lógico Programável *TP-02;*
2 – Interface Homem-Máquina *OP-06;*
3 – Conversor de Comunicação *TP232PG (RS422/RS232);*
4 – Conector *DB9-DB9;*
5 – Conversor de Comunicação *ADAM-4520 (RS232/RS485);*
6 – Servoconversor *SCA-04;*
7 – Conversor de Comunicação *MIW-02 (RS485/RS232);*
8 – Alimentação *+24Vdc* e Comunicação *TR+/TR- (TP-02/OP-06);*
9 – Cabo de Conexão *TP-202MC;*
10 – Alimentação *+24Vdc;*
11 – Cabo de Comunicação entre pontos da rede;
12 – Cabo de Conexão *RJ11/RJ11.*

4.7 SERVOACIONAMENTO *WEG*

4.7.1 *CARACTERÍSTICAS DOS SERVOCONVERSORES*

Características Técnicas

- Regulação em modo posicionador / velocidade / torque

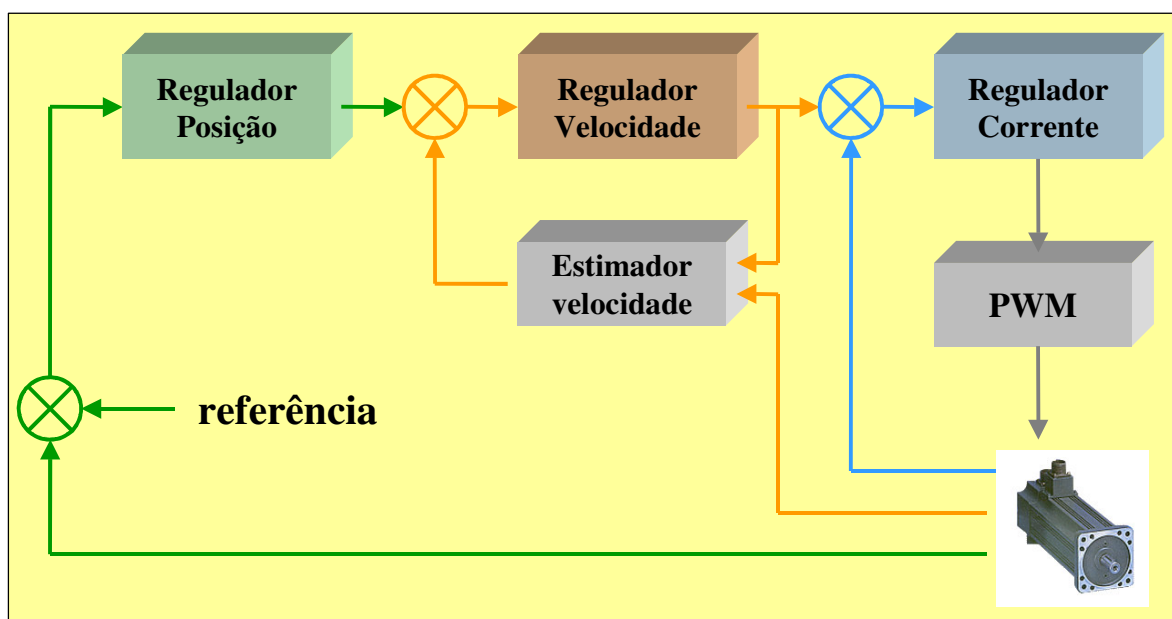



Figura 25 – Estrutura de Controle.

- Modo posicionamento

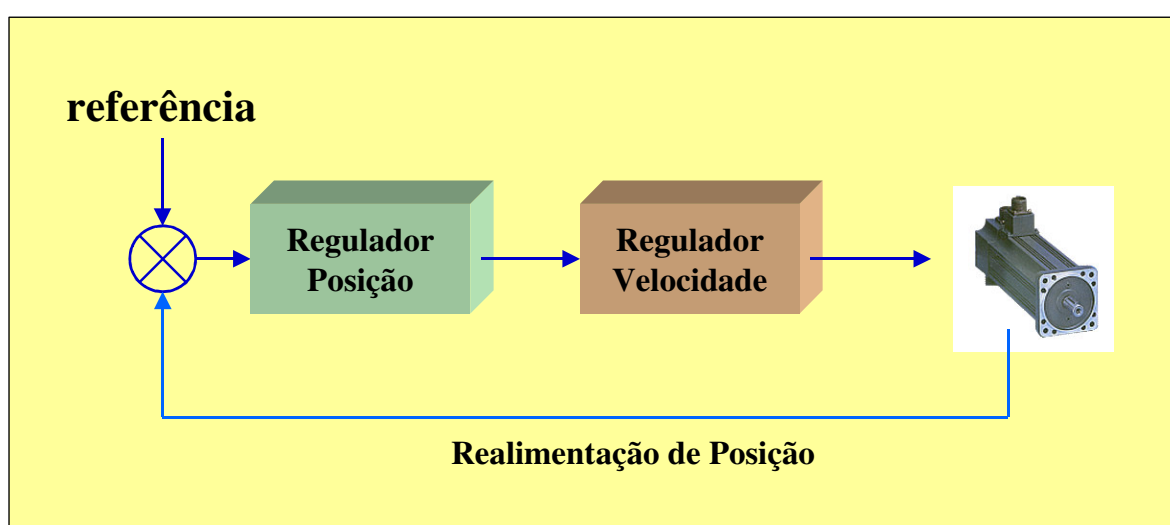



Figura 26 – Modo Posicionamento.

- Modo velocidade

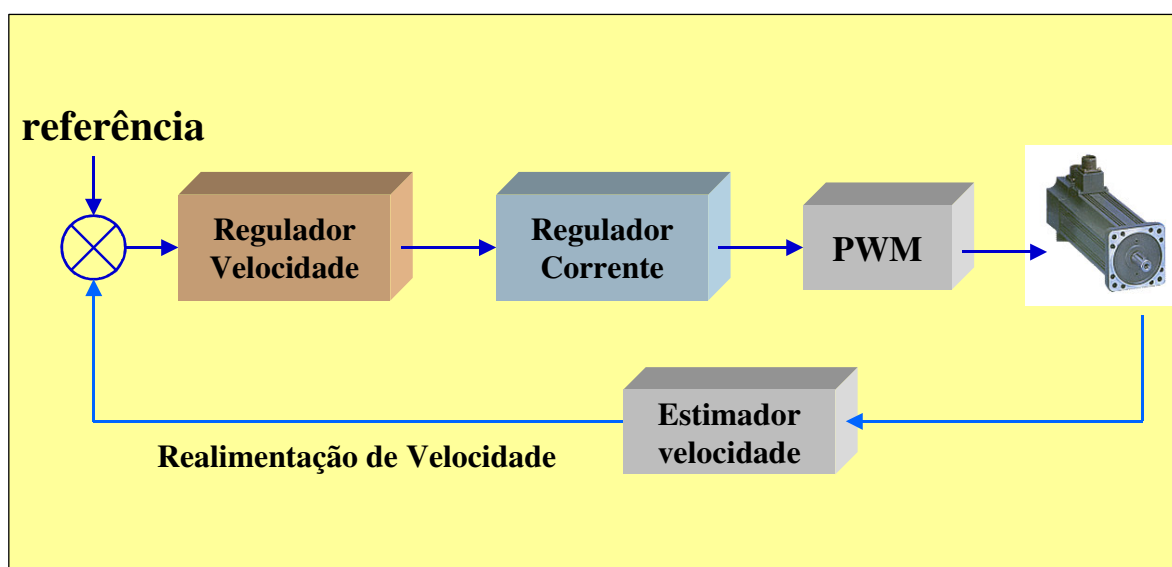



Figura 27 – Modo Velocidade

- Modo Torque

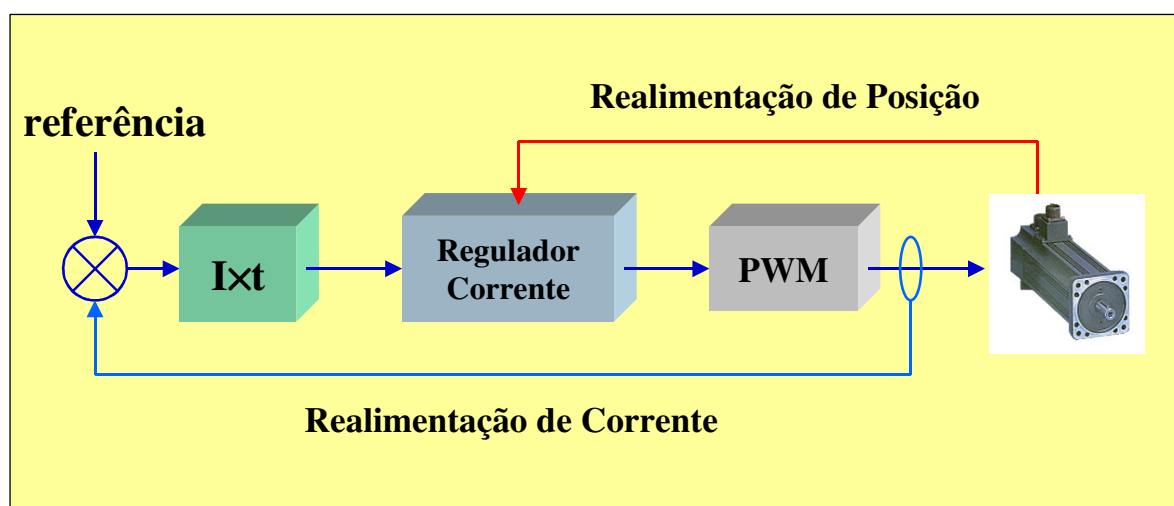



Figura 28 – Modo Torque.

- Função STOP (programável via parâmetro) utilizada no modo de velocidade: ao ser acionada faz o motor ser desacelerado até parar. Quando a função é desabilitada o motor acelera até atingir a referência de velocidade.

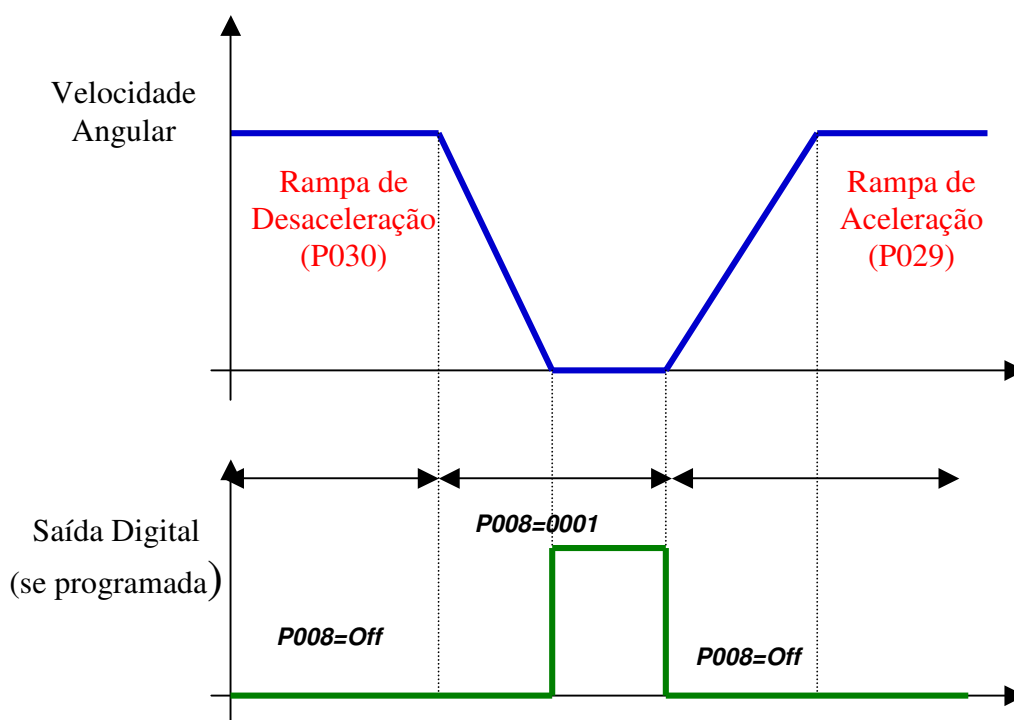



Figura 29 – Velocidade angular x Saída digital.

- Função STOP PLUS incorporada (com 2 posicionamentos programáveis via parâmetro), com rampa de aceleração e desaceleração programáveis: ao ser acionada faz o motor acelerar até atingir a velocidade de referência a qual ele mantém até começar a desacelerar, quando então ele consegue a rampa de desaceleração até parar e travar o eixo. O motor percorre a distância setada na referência de STOP PLUS.

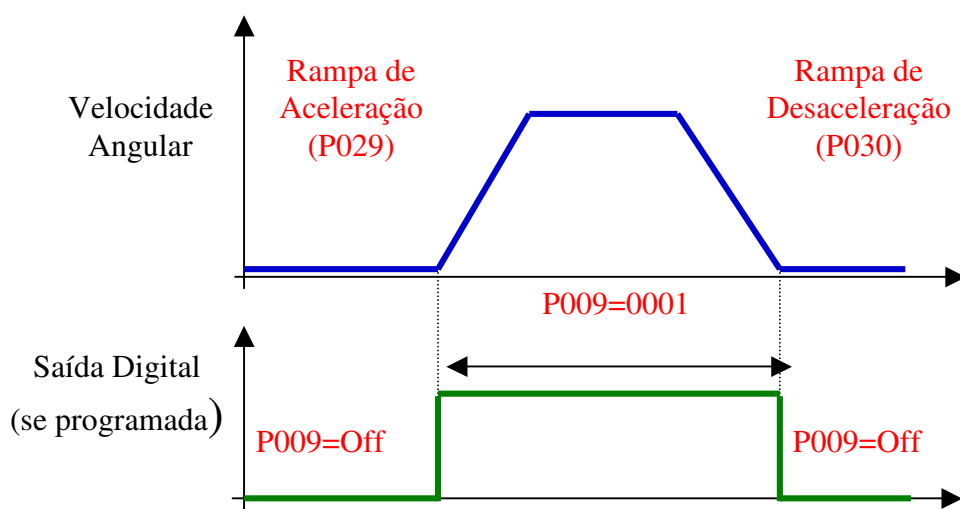



Figura 30 – Posição x Saída digital.

- Controle de torque tipo "PID digital com Feedfoward" e controle de velocidade tipo "Enhanced PID";

- Simulador de encoder incorporado: simula os sinais A, $\overline{A}$, B, $\overline{B}$, N e $\overline{N}$; programável de 1 a 2048 pulsos/rotação;
- Comunicação serial RS – 232C;
- Módulo posicionador POS – 01, com 8 entradas digitais e 6 saídas digitais (opcional);
- Programação de parâmetros via IHM incorporada, via IHM remoto ou via serial (microcomputador PC);
- Transistores de potência *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)* para o acionamento silencioso e eficiente dos servomotores. Os transistores evitam a comutação que existem nos tiristores, mas em compensação necessita de *CC* na base durante o estado de condução. Com o uso do *IGBT* o liga/desliga é pelo executado através do gate; chaveamento por tensão; freqüência de operação menor que *20 kHz*; faixa de potência de *1 KVA* até *100 KVA* e tamanho reduzido dos *drivers* (controladores);
- Transistor de frenagem incorporado.

Especificações Técnicas	**Unidades**	**Modelos**		
		SCA – 04 04/08	**SCA – 04 08/16**	**SCA – 04 24/48**
Corrente nominal	Arms	4	8	24
Corrente dinâmica (3s)	Arms	8	16	48
Alimentação	Vca	3 x 220/230 V (+10%, -15%)		
Tensão de saída	Vca	0 ...200-230 V		
Frequência de chaveamento	kHz	8		
Entradas digitais programáveis	qtde	4 (15 ...24 Vcc)		
Entradas analógicas programáveis	qtde	2 (-10 ...0 ...+10 V) (11bits)		
Resolução de velocidade	-	1:65536 (16 bits)		
Temperatura de ambiente	°C	0 ...45		
Grau de Proteção (*)	-	IP20		
Massa	Kg	5,6	5,6	6,3
Dimensão "A" (ver figura do SCA - 04)	mm	77	77	97

Tabela 5 – Carcaterísticas Técnicas do SCA - 04

(*)Grau de proteção: *IP20* (*2*➔corpos estranhos de dimensões acima *12 mm;0*➔sem proteção).
1º algarismo: grau de proteção contra corpos sólidos e contato acidental;
2º algarismo: grau de proteção contra penetração de água.

Especificações			
Códigos	**Modelos dos SCA - 04**	**Corrente Nominal (A rms)**	**Tensão (V)**
417110040	SCA – 04 4/8 – H2	4	220 trifásica
417110042	SCA – 04 8/16 – H2	8	
417110044	SCA – 04 24/48 – H2	24	

Dimensões do Servoconversor SCA – 04

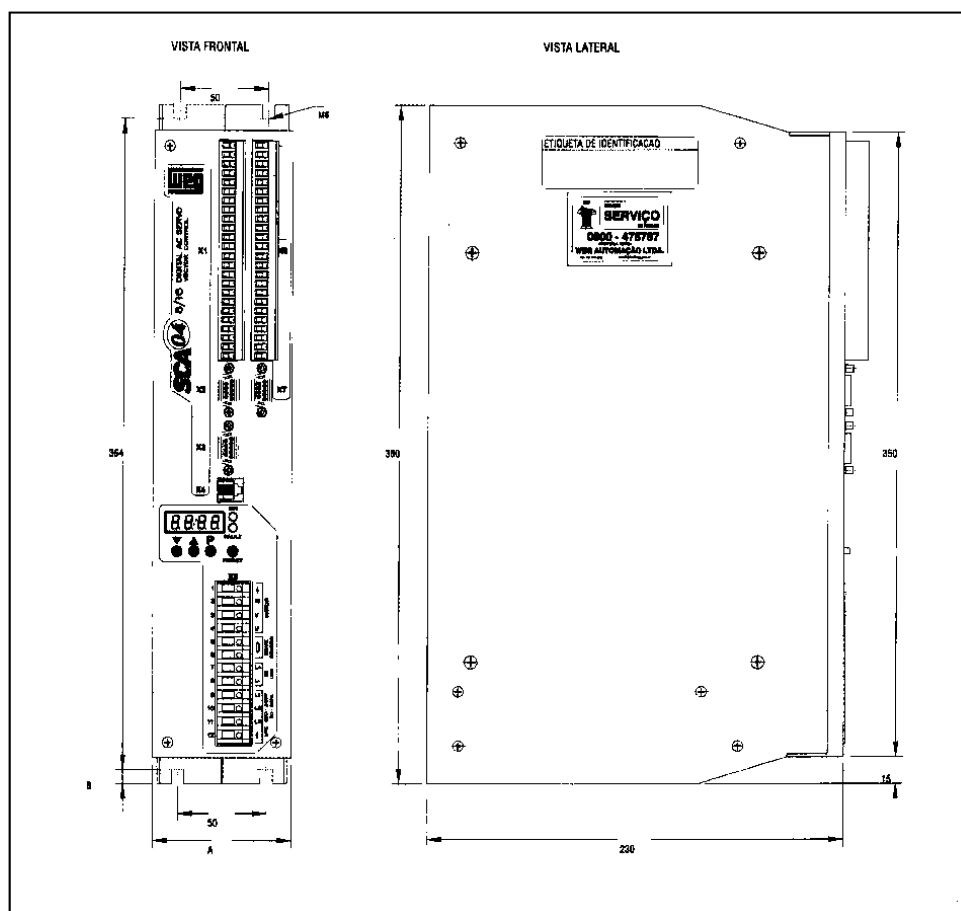



Figura 31 – Dimensões para SCA – 04.

4.7.2 *AUTOTRANSFORMADOR*

<table>
<tr><td rowspan="9">Quando a alimentação da rede for 380V ou 440V trifásica, deve-se utilizar um autotransformador de potência com as seguintes carcaterísticas:
Potência do autotrafo (Kva) = ΣPotência servomotor (KW) x 1,25 x Fator de utilização(*)
(*) Em aplicações com mais de um servomotor, o autotransformador pode ser otimizado pelo fator de utilização 0,7 (tempo de serviço conforme norma VDE 0530 parte 1).</td><th colspan="4">Especificações</th></tr>
<tr><th>Códigos</th><th>Tensão Primária</th><th>Tensão Secundária</th><th>Potência (kVa)</th></tr>
<tr><td>0307.1847</td><td rowspan="7">380 e 440 V</td><td rowspan="7">220 V</td><td>1</td></tr>
<tr><td>0307.1855</td><td>1,5</td></tr>
<tr><td>0307.1863</td><td>2</td></tr>
<tr><td>0307.1871</td><td>3</td></tr>
<tr><td>0307.1880</td><td>5</td></tr>
<tr><td>0307.1898</td><td>7,5</td></tr>
<tr><td>0307.1901</td><td>10</td></tr>
</table>

Tabela 6 – Especificação Técnica do Autotransformador.

4.7.3 *RESISTOR DE FRENAGEM*

Especificações Técnicas	Descrições
Potência máxima de frenagem (rms)	200 W
Resistência	30 Ω
Código	**Descrição**
4035.0292	Módulo de frenagem

Tabela 7 – Especificação Técnica do RF – 200.

Dimensões do Resistor de Frenagem RF-200

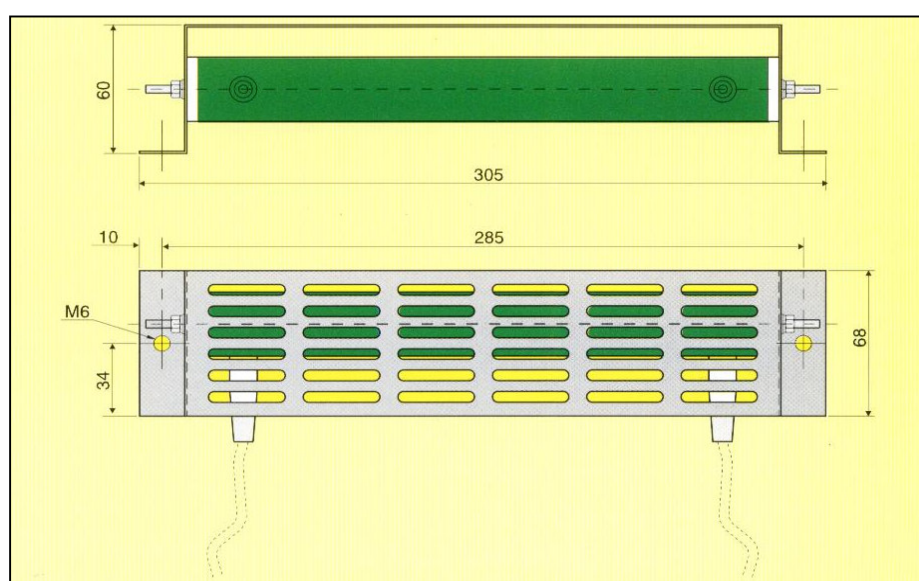



Figura 32 – Resistor RF-200.

Para estipular o número máximo de servoconversores à serem ligados em paralelo, com um único resistor de frenagem podemos utilizar a seguinte equação:

$$\sum Inom \, . \, 0,7 \leq Irms \qquad (41)$$

Onde: *Inom* é a corrente de rotor bloqueado do servo;
N é o número de servoconversores acionados simultaneamente;
Irms é a corrente nominal do servo.

Obs.: Caso a equação acima não seja satisfeita, dividir o grupo de servomotores em grupos menores, utilizando um módulo *RF-200* para cada subgrupo.

Exemplo: *02* servomotores *SWA – 56 – 4,0 – 30,* onde a *Io = 5,7 Arms.*
$\sum Inom \, . \, 0,7 \leq Irms \rightarrow (5,7 + 5,7) \, . \, 0,7 \leq 8 \; Arms$
$7,98 \leq 8 \; Arms$

4.7.4 *INTERFACE HOMEM MÁQUINA REMOTA IHM – 4S (OPCIONAL)*

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
• IHM remota para uso com o SCA – 04; • Conectada via cabo serial padrão RS-232C; • Alimentação pelo próprio cabo serial não necessitando alimentação externa; • Display de cristal líquido (2 linhas x 16 colunas) com iluminação (back light); • Possui 8 teclas (sendo 2 programáveis) e 3 LED's sinalizadores.
FUNÇÕES
• Alteração de todos parâmetros do SCA-04; • Execução de funções tais como: habilitação, stop, stop plus e sentido de giro via teclas programáveis; • Teclas para execução de JOG (utilizado no modo stop plus e/ou com cartão opcional POS - 01); • Função copy: copia todos os parâmetros do servo para a IHM ou vice-versa; • Entrada de referência de posição e velocidade com fator de escala programado na própria IHM (pode-se entrar com as referências na unidade determinada pelo usuário).

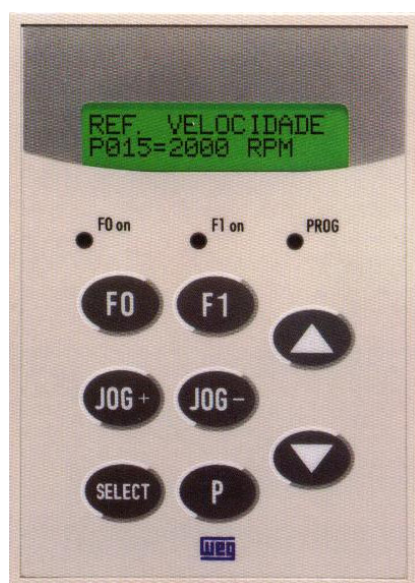
Tabela 8 – Especificação Técnica da IHM 4S.

Interface Homem Máquina – IHM 4S

Figura 33 – IHM 4S

Especificações			
Código	**Tipo**	**Modelo**	**Descrição**
41710022	IHM	IHM – 4S	Módulo Interface Homem-Máquina Remota p/ SCA - 04
0307.4820	Cabo de interligação para IHM – 4S	-	Cabo de 1 m
0307.4838			Cabo de 2 m
0307.4846			Cabo de 3 m
0307.5281			Cabo de 5 m
0307.5290			Cabo de 7,5 m
0307.5303			Cabo de 10 m

Tabela 9 – Especificação dos Códigos da IHM 4S.

4.7.5 *PLACA POSICIONADORA POS-01 (OPCIONAL)*

O cartão opcional POS-01 permite transformar o servoconversor SCA-04 em um módulo posicionador de um eixo.

Características Técnicas
• Posicionamento com perfil trapezoidal e "S" (absoluto e relativo) • Programação Mestre/Escravo/Sincronismo entre 2 ou mais motores ou electronic gearbox(caixa de engrenagens) • Busca de zero máquina (homming) • Blocos de CLP como temporizadores e contadores • Programação em linguagem Ladder através do Software WLP

Tabela 10 – Características Técnica da POS-01.

Especificações Técnicas	
Programação por Parâmetros	**Quantidades**
Posicionamento	4
Velocidades	2
Acelerações	2
Temporizadores	2
Contadores	2
Programação de até 5 posicionamentos "ensinados"	

Tabela 11– Especificação Técnica da POS-01.

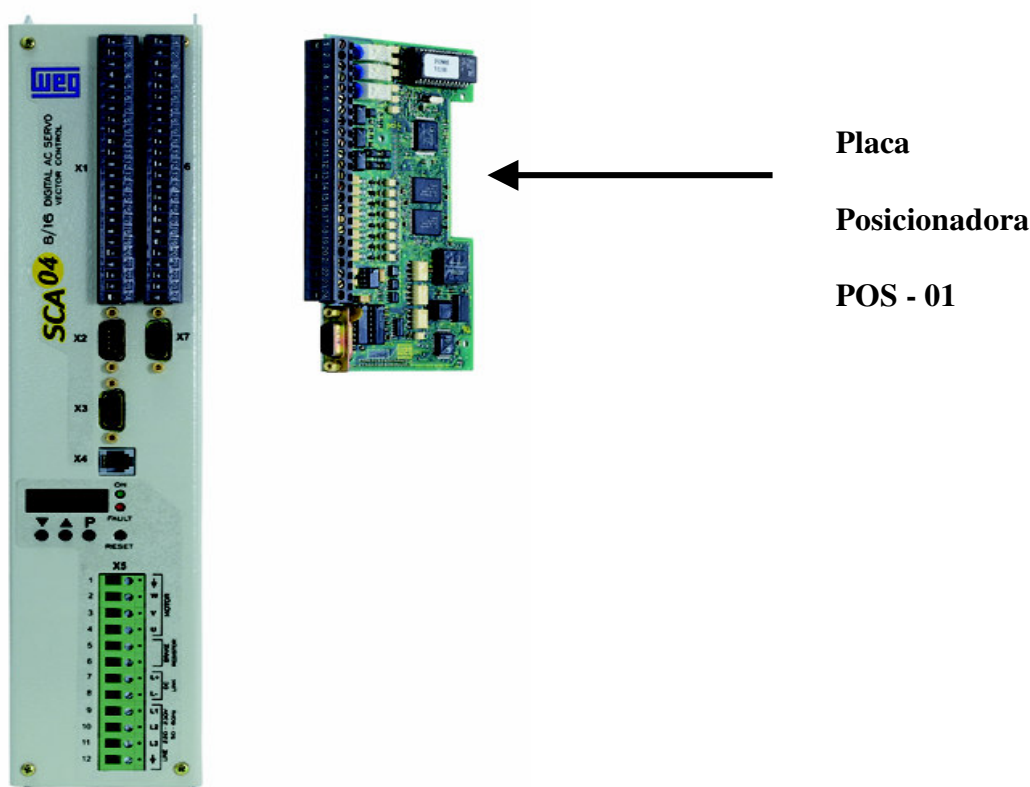



Figura 34 – SCA-04 com Placa POS 01.

As variáveis de posicionamento, velocidade, aceleração, temporização e contadores podem ser programados também por constantes. Neste caso, o número de blocos a ser utilizados é bem mais amplo, limitado apenas pelo espaço de 2 Kbytes de memória de programa do usuário.

Exemplo de Trajetória com Utilização da Placa POS - 01

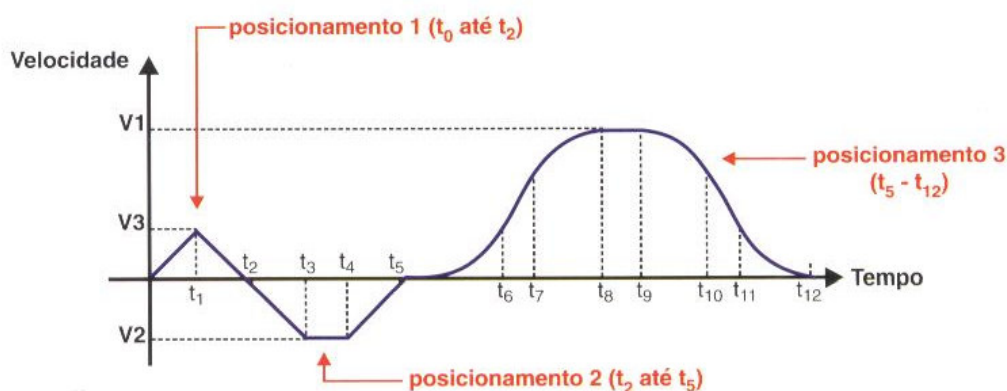



Figura 35 – Perfil de Deslocamento.

Especificações Técnicas		
Entradas/Saídas	**Quantidades**	**Descrições**
Entradas digitais	8	24 Vcc
Saídas a relé	3	125 Vca/0,5 A ou 250 Vca/0,25 A
Saídas transistorizadas	3	24 Vcc/250 mA
Saída analógica	1	± 10 V (11 bits)
Entrada diferencial de encoder	1	a 15 V

Tabela 12 – Especificação Técnica da POS 01.

4.7.5.1 *POSICIONADOR POS – 01 JÁ INCORPORADO DE FÁBRICA AO SERVOCONVERSOR SCA – 04*

Especificações			
Código	**Modelo do SCA - 04**	**Corrente Nominal (A rms)**	**Tensão (V)**
417110041	SCA – 04 4/8 + POS-01 / H2	4	220 trifásica
417110043	SCA – 04 8/16 + POS-01 / H2	8	
417110045	SCA – 04 24/48 + POS-01 / H2	24	

Tabela 13 – Especificação dos Códigos para POS 01.

4.7.5.2 *KIT DE POSICIONADOR POS –01 PARA TRANSFORMAR O SCA – 04 EM SCA – 04 + POS 01*

Especificações		
Código	**Tipo**	**Descrição**
417110023	Kit POS - 01	POS – 01 p/ SCA – 04.4/8 (Cartão POS – 01 + Tampa)
		POS – 01 p/ SCA – 04.8/16 (Cartão POS – 01 + Tampa)
417110024		POS – 01 p/ SCA – 04.24/48 (Cartão POS – 01 + Tampa)

Tabela 14 – Especificação dos Códigos para o Kit POS 01.

4.7.6 *WEG LADDER PROGRAMMER /WLP – 01 (OPCIONAL)*

Características Técnicas
• Ambiente Windows (32 bits)
• Fácil programação em linguagem Ladder conforme norma IEC 1131-3
• Edição gráfica com textos (comentários e tags)
• Comunicação serial em RS-232C
• Impressão do projeto
• Ajuda on-line

Tabela 15 – Características Técnica do WLP.

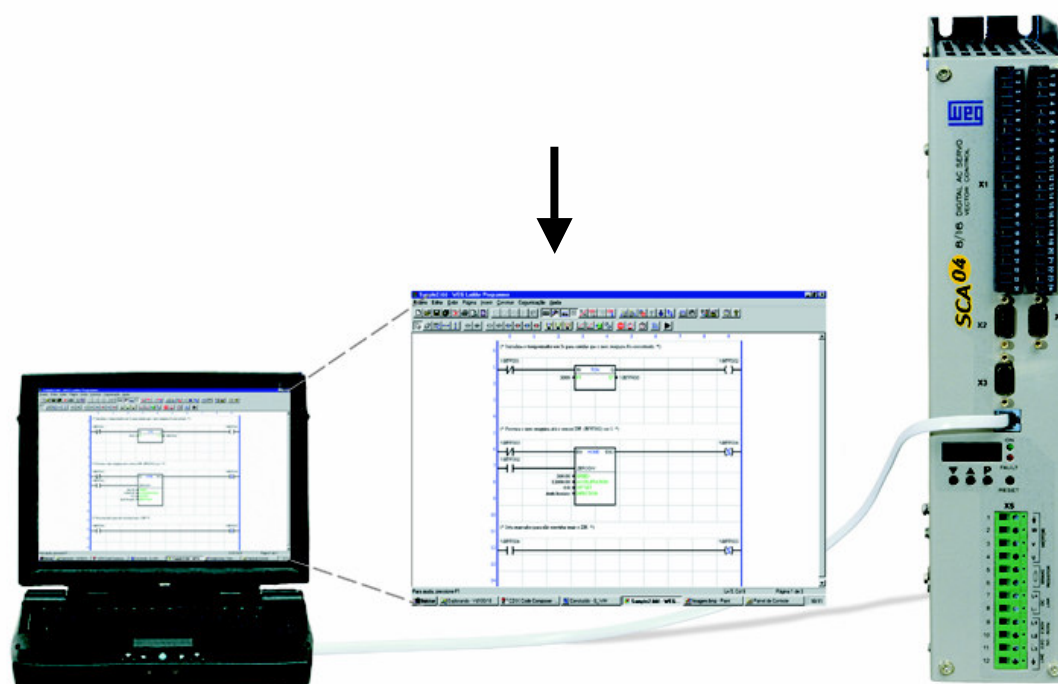



Figura 36 – Comunicação Serial RS-232 do WLP.

Principais Comandos
• Contatos: normalmente aberto e fechado;
• Bobinas: negativa, de transição negativa, de transição positiva, de set e de reset;
• Blocos Comparadores: de posição, velocidade e de zero de máquina;
• Blocos de Posicionamento: com perfis "S" e trapezoidal;
• Blocos de CLP: temporizadores e contadores;
• Blocos: de saída analógica, busca de zero de máquina e eletronic gear box (caixa de engrenagens).

Tabela 16 – Comandos do WLP.

Especificações			
Código	**Tipo**	**Modelo**	**Descrição**
417102507	Software	WLP-01	Software do Programador Ladder p/ SCA - 04

Tabela 17 – Especificação do Código do WLP.

4.7.7 *SERVOMOTORES SWA*

Características Técnicas	Especificações Técnicas
• Força contra-eletromotriz senoidal • Rotação suave e uniforme em todas as velocidades; • Baixo nível de ruído e vibração; • Ampla faixa de rotação com torque constante; • Baixa manutenção (servomotores sem escovas); • Elevada capacidade de sobrecarga; • Baixa inércia; • Resposta dinâmica rápida. **Opcionais** • Freio eletromagnético • Flange para encoder incremetal tipo ROD (**)	• Grau de proteção IP 55 (5 ➔ proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor; 5 ➔ jatos de água de todas as direções). 1º algarismo: grau de proteção contra corpos sólidos e contato acidental; 2º algarismo: grau de proteção contra penetração de água. • Isolamento Classe H; • Realimentação por resolver; • Formas construtivas B5 (sem pés, fixado pela flange), V1 (sem pés, fixado pela flange para baixo) e V3 (sem pés, fixado pela flange para cima); • Protetor térmico (PTC) (***); • Ponta de eixo com chaveta NBR 6375; • Ímãs de terras raras (Neodímio-Ferro-Boro); • Rolamento com lubrificação permanente; • Retentor para vedação do eixo; • Temperatura máxima de operação em regime permanente: ΔT = 100°C.

Tabela 18 – Especificação do Servomotor SWA.

(*) Freio eletromagnético

O freio montado entre o motor e o resolver é do tipo que atua por falta de corrente: freia quando desenergizado e libera o movimento do eixo quando alimentado por tensão contínua de *24 V ± 10%.* Antes de ligar o motor deve-se excitar o freio. Em princípio o freio é um freio de parada (por exemplo, para manter imóvel um eixo de avanço vertical quando o motor está sem alimentação) ou de emergência (para o caso de falta de energia). O freio não é previsto para utilização em frenagem dinâmica. Em condições normais de operação o freio não quer manutenção. A corrente varia conforme as carcaças, veja a seguir:

Carcaça 56 ➔ Imín = 1 A (24 W) ➔ Cmáx = 9 N.m
Carcaça 71 ➔ Imín = 1,5 A (36 W) ➔ Cmáx = 17 N.m

Para os servomotores com freio deverá ser vendido um cabo de potência adicional, modelo *CP3A – XX,* para alimentação do freio. Neste caso apenas as vias *A* e *B* (preto e vermelho) são utilizados.

(**) Encoder Incremental

Seu funcionamento está baseado na interrupção ou não de um sinal óptico, normalmente um feixe luminoso, conseguido comumente através de um emissor e um sensor separados por um nônio e um disco de vidro, plástico ou metal estriados que alternamente permitem ou não a passagem de luz do emissor para o receptor. Quando o disco sofre um deslocamento angular

interrompe a passagem de luz, gerando um pulso. Este pulso representa um certo ângulo mínimo, que define a resolução do sistema. Cada deslocamento angular representa um pulso, por exemplo se a posição do encoder estiver na posição zero, para atingir o ângulo *10* deverão ser somados dez pulsos na saída. Porém se todo sistema de medição for desligado e o eixo se mover por inércia, o sistema de posição perderá a posição relativa. Quando o sistema for desligado o mesmo deverá ter sua referência zerada. Um encoder incremental pode fornecer o sentido de rotação através do nônio ou de duas faixas defasadas angularmente. Desta maneira um circuito eletrônico pode detectar por lógica, qual sentido da rotação.

(***) **Protetor térmico (termistor – *PTC*: coeficiente de temperatura positivo)**

São compostos por sensores semicondutores que variam sua resistência bruscamente ao atingirem uma determinada temperatura. Essa variação brusca de resistência interrompe a corrente no *PTC,* acionando um relê de saída, o qual desliga o circuito principal. Também pode ser utilizado para sistemas de alarme ou alarme e desligamento (*2* por fase). Os termistores possuem tamanho reduzido, não sofrem desgastes mecânicos e têm uma resposta mais rápida em relação aos outros detetores. Os termistores com seus respectivos circuitos eletrônicos de controle oferecem proteção completa contra sobreaquecimento produzido por falta de fase, sobrecarga, sub ou sobretensões ou freqüentes operações de reversão ou liga-desliga.

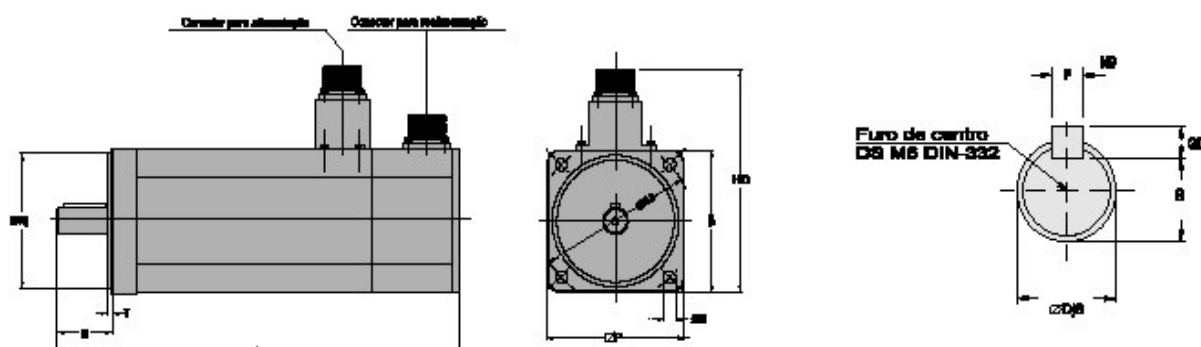
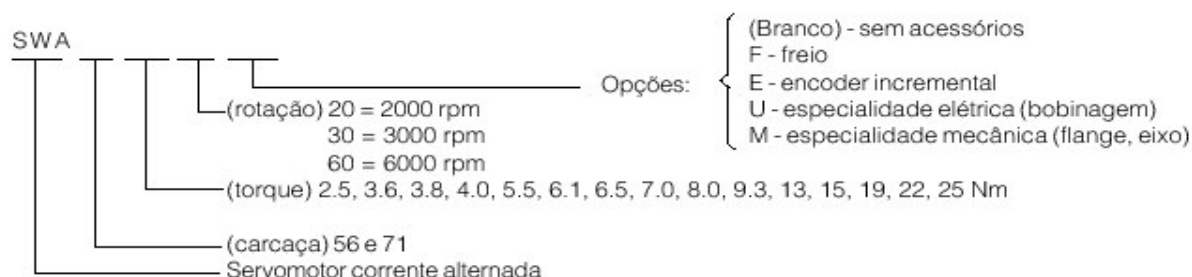



Figura 37 – Dimensões do SWA.

Carcaça	Flange						Ponta de Eixo				
	HD	**P**	**M**	**N**	**S**	**T**	**D**	**E**	**F**	**G**	**GD**
56	160	102	115	95j6	9	3	19j6	40	6n9	15,5	6
71	200	142	165	130j6	11	3,5	24j6	50	8n9	20	7

Tabela 19 – Dimensões do SWA.

Especificação do SWA

4.7.8 *ACESSÓRIOS PARA SERVOACIONAMENTOS*

Especificações				
Código	**Tipo**	**Especificações Técnicas**	**Modelo**	**Descrição**
0307.5117	Cabo de Potência CP3A	4 X 1,5 mm^2	CP3A - 03	Cabo de 3 m
0307.5125			CP3A – 06	Cabo de 6 m
0307.5133			CP3A – 09	Cabo de 9 m
0307.5141			CP3A – 12	Cabo de 12 m
0307.5150			CP3A – 15	Cabo de 15 m
0307.5168	Cabo de Potência CP4A	4 X 4,0 mm^2	CP4A - 03	Cabo de 3 m
0307.5176			CP4A – 06	Cabo de 6 m
0307.5184			CP4A – 09	Cabo de 9 m
0307.5192			CP4A – 12	Cabo de 12 m
0307.5206			CP4A – 15	Cabo de 15 m
0307.5060	Cabo de Resolver CSRW	8 vias (6 X 0,2+ 2 X 0,5) mm^2	CSRW - 03	Cabo de 3 m
0307.5079			CSRW – 06	Cabo de 6 m
0307.5087			CSRW – 09	Cabo de 9 m
0307.5095			CSRW – 12	Cabo de 12 m
0307.5109			CSRW – 15	Cabo de 15 m
0307.4331	Cabo Simulador de Encoder	8 vias (6 X 0,2+ 2 X 0,5) mm^2	CECA – 02	Cabo de 2 m

Tabela 20 – Especificação dos Cabos.

7.8.1 ACESSÓRIOS OPCIONAIS PARA SERVOMOTORES

Especificações	
Código	**Descrição**
1900.7523	Flange p/ Encoder (padrão ROD) para SWA 56
1900.7531	Flange p/ Encoder (padrão ROD) para SWA 71

Tabela 21 – Especificação dos Códigos para Adaptação do Encoder.

4.7.9 *SERVOMOTORES SWA*

Especificações														
									Servoconversores			*Cabos de ligação entre o SWA e SCA-04*		
	Código	*Modelo do Servomotor*	*Torque Bloq. M_o (N.m)*	*Corrente I_o (A) (RMS)*	*Potência Nominal (kW)*	*Massa (Kg)*	*Inércia x 10^{-3} (kg.m^2)*	*Comprimento "L"*	*SCA - 04 04/08*	*SCA - 04 08/16*	*SCA - 04 24/48*	*Cabo de Potência*	*Cabo de Resolver (realimentação)*	*Cabo para Freio CSRW*
2000 RPM	***1900.7280***	***SWA 56-2,5-20***	***2,5***	***2,5***	***0,36***	***6,5***	***0,35***	***319,5***	***X***			***CP3A***	***CSRW***	***CP3A***
	1900.7299	***SWA 56-3,8-20***	***3,8***	***3,8***	***0,70***	***7,5***	***0,44***	***339,5***	***X***					
	1900.7302	***SWA 56-6,1-20***	***6,1***	***5,2***	***1,10***	***9,4***	***0,63***	***379,5***		***X***				
	1900.7310	***SWA 56-8,0-20***	***8,0***	***6,5***	***1,32***	***11,2***	***0,81***	***419,5***		***X***				
	1900.7329	***SWA 71-9,3-20***	***9,3***	***8,0***	***1,60***	***16,1***	***2,10***	***366,5***		***X***		***CP4A***		
	1900.7337	***SWA 71-13-20***	***13***	***11,8***	***2,30***	***19,1***	***2,84***	***396,5***			***X***			
	1900.7345	***SWA 71-15-20***	***15***	***13,0***	***2,50***	***21,1***	***3,55***	***426,5***			***X***			
	1900.7353	***SWA 71-19-20***	***19***	***15,1***	***2,90***	***24,1***	***4,27***	***456,5***			***X***			
	1900.7361	***SWA 71-22-20***	***22***	***18,5***	***3,40***	***26,1***	***4,99***	***486,5***			***X***			
	1900.7370	***SWA 71-25-20***	***25***	***21,5***	***3,40***	***31,1***	***6,43***	***546,5***			***X***			
3000 RPM	***1900.7388***	***SWA 56-2,5-30***	***2,5***	***3,8***	***0,66***	***6,5***	***0,35***	***319,5***	***X***			***CP3A***		
	1900.7396	***SWA 56-4,0-30***	***4,0***	***5,7***	***0,88***	***7,5***	***0,44***	***339,5***		***X***				
	1900.7400	***SWA 56-6,1-30***	***6,1***	***8,5***	***1,30***	***9,4***	***0,63***	***379,5***		***X***				
	1900.7418	***SWA 56-7,0-30***	***7,0***	***9,0***	***1,50***	***11,2***	***0,81***	***419,5***			***X***	***CP4A***		
	1900.7426	***SWA 71-9,3-30***	***9,3***	***12,0***	***2,05***	***16,1***	***2,10***	***366,5***			***X***			
	1900.7434	***SWA 71-13-30***	***13***	***18,0***	***2,85***	***19,1***	***2,84***	***396,5***			***X***			
	1900.7442	***SWA 71-15-30***	***15***	***20,0***	***3,30***	***21,1***	***3,55***	***426,5***			***X***			
	1900.7450	***SWA 71-19-30***	***19***	***23,0***	***4,20***	***24,1***	***4,27***	***456,5***			***X***			
6000 RPM	***1900.7469***	***SWA 56-2,5-60***	***2,5***	***7,5***	***1,13***	***6,5***	***0,35***	***319,5***		***X***		***CP3A***		
	1900.7477	***SWA 56-3,6-60***	***3,6***	***10,3***	***1,60***	***7,5***	***0,44***	***339,5***			***X***	CP4A		
	1900.7485	***SWA 56-5,5-60***	***5,5***	***15,5***	***2,40***	***9,4***	***0,63***	***379,5***			***X***			
	1900.7493	***SWA 56-6,5-60***	***6,5***	***16,3***	***2,50***	***11,2***	***0,81***	***419,5***			***X***			

Tabela 22 – Características Técnica do SWA.

4.7.10 *SERVOMOTORES SWA COM FREIO ELETROMAGNÉTICO*

Especificações														
	Código	*Modelo do Servomotor*	*Torque Bloq. M_o (N.m)*	*Corrente I_o (A) (RMS)*	*Potência Nominal (kW)*	*Massa (Kg)*	*Inércia x 10^{-3} (kg.m^2)*	*Comprimento "L"*	Servoconversores: *SCA - 04 04/08*	*SCA - 04 08/16*	*SCA - 04 24/48*	Cabos de ligação entre o SWA e SCA-04: *Cabo de Potência*	*Cabo de Resolver (realimentação)*	*Cabo para Freio CSRW*
2000 RPM	***1900.7280***	***SWA 56-2,5-20***	***2,5***	***2,5***	***0,36***	***6,5***	***0,35***	***319,5***	***X***			***CP3A***	***CSRW***	***CP3A***
	1900.7299	***SWA 56-3,8-20***	***3,8***	***3,8***	***0,70***	***7,5***	***0,44***	***339,5***	***X***					
	1900.7302	***SWA 56-6,1-20***	***6,1***	***5,2***	***1,10***	***9,4***	***0,63***	***379,5***		***X***				
	1900.7310	***SWA 56-8,0-20***	***8,0***	***6,5***	***1,32***	***11,2***	***0,81***	***419,5***		***X***				
	1900.7329	***SWA 71-9,3-20***	***9,3***	***8,0***	***1,60***	***16,1***	***2,10***	***366,5***		***X***		***CP4A***		
	1900.7337	***SWA 71-13-20***	***13***	***11,8***	***2,30***	***19,1***	***2,84***	***396,5***			***X***			
	1900.7345	***SWA 71-15-20***	***15***	***13,0***	***2,50***	***21,1***	***3,55***	***426,5***			***X***			
	1900.7353	***SWA 71-19-20***	***19***	***15,1***	***2,90***	***24,1***	***4,27***	***456,5***			***X***			
	1900.7361	***SWA 71-22-20***	***22***	***18,5***	***3,40***	***26,1***	***4,99***	***486,5***			***X***			
	1900.7370	***SWA 71-25-20***	***25***	***21,5***	***3,40***	***31,1***	***6,43***	***546,5***			***X***			
3000 RPM	***1900.7388***	***SWA 56-2,5-30***	***2,5***	***3,8***	***0,66***	***6,5***	***0,35***	***319,5***	***X***			***CP3A***		
	1900.7396	***SWA 56-4,0-30***	***4,0***	***5,7***	***0,88***	***7,5***	***0,44***	***339,5***		***X***				
	1900.7400	***SWA 56-6,1-30***	***6,1***	***8,5***	***1,30***	***9,4***	***0,63***	***379,5***		***X***				
	1900.7418	***SWA 56-7,0-30***	***7,0***	***9,0***	***1,50***	***11,2***	***0,81***	***419,5***			***X***	***CP4A***		
	1900.7426	***SWA 71-9,3-30***	***9,3***	***12,0***	***2,05***	***16,1***	***2,10***	***366,5***			***X***			
	1900.7434	***SWA 71-13-30***	***13***	***18,0***	***2,85***	***19,1***	***2,84***	***396,5***			***X***			
	1900.7442	***SWA 71-15-30***	***15***	***20,0***	***3,30***	***21,1***	***3,55***	***426,5***			***X***			
	1900.7450	***SWA 71-19-30***	***19***	***23,0***	***4,20***	***24,1***	***4,27***	***456,5***			***X***			
6000 RPM	***1900.7469***	***SWA 56-2,5-60***	***2,5***	***7,5***	***1,13***	***6,5***	***0,35***	***319,5***		***X***		***CP3A***		
	1900.7477	***SWA 56-3,6-60***	***3,6***	***10,3***	***1,60***	***7,5***	***0,44***	***339,5***			***X***	CP4A		
	1900.7485	***SWA 56-5,5-60***	***5,5***	***15,5***	***2,40***	***9,4***	***0,63***	***379,5***			***X***			
	1900.7493	***SWA 56-6,5-60***	***6,5***	***16,3***	***2,50***	***11,2***	***0,81***	***419,5***			***X***			

Tabela 23 – Características Técnica do SWA com Freio.

4.7.11 *CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS SERVOMOTORES SWA*

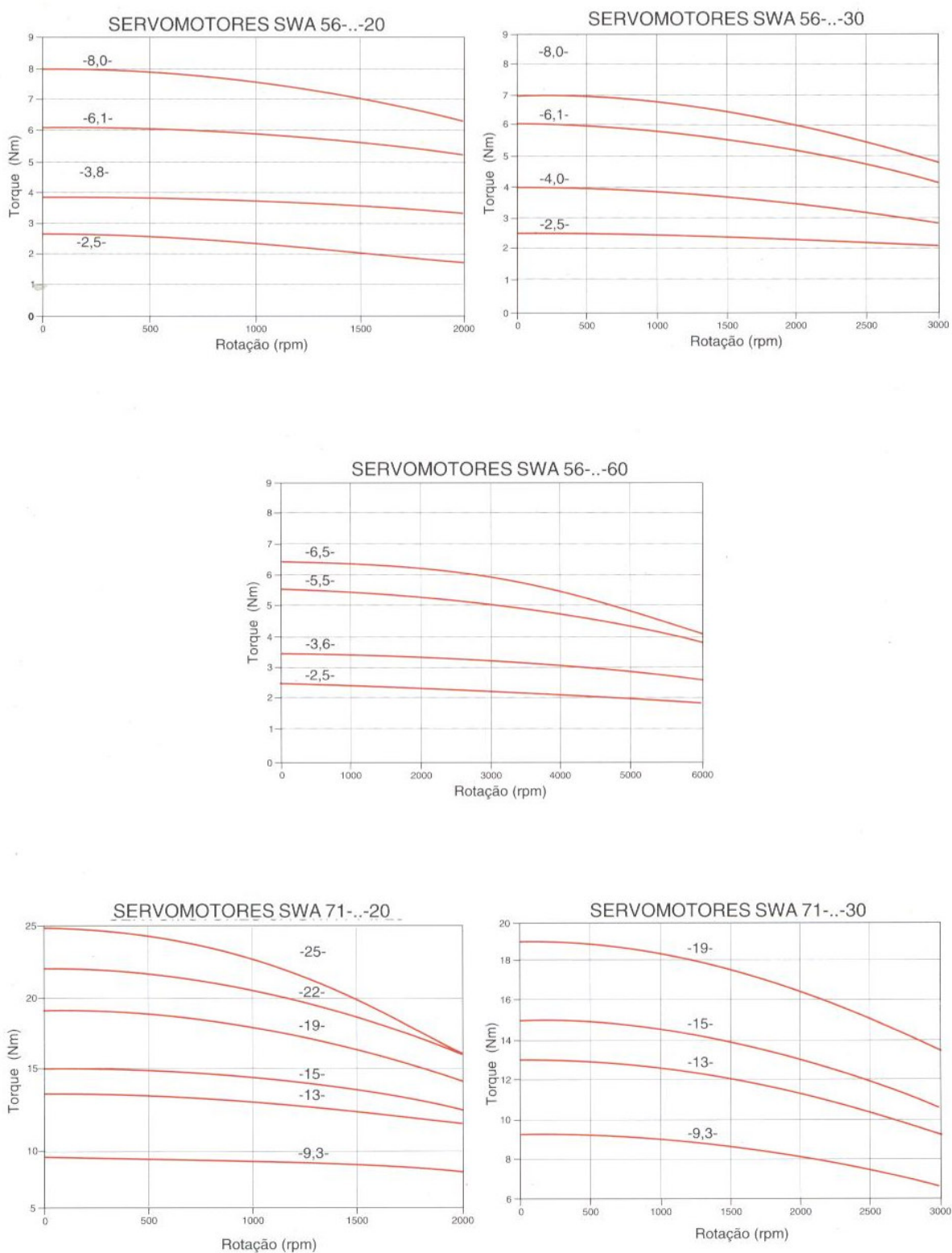



Figura 38 – Curvas de Torque Nominal para Elevação de Temperatura 100°C.

Exemplos práticos de dimensionamento do servomotor e servoconversor:

1. Dimensionar o servomotor para um alimentador de prensa (sistema tipo calandra) com as seguintes características:
   a) velocidade máxima : 2 m/s
   b) força externa : 100 N
   c) diâmetro dos rolos tracionadores : 80 mm
   d) largura dos rolos tracionadores : 50 mm
   e) rampa de aceleração : 0.1 s
   f) rendimento do sistema : 85 %
   g) redução : 4 : 1
   h) massa da chapa : 2 kg
   i) momento de inércia do redutor : 0.0012 kgm^2

solução:

a) rotação do motor

$$n_m = \frac{v \times 6 \times 10^4 \times i}{\pi \times d_3} = \frac{2 \times 6 \times 10^4 \times 4}{\pi \times 80} = 1910\,\text{rpm}$$

b) torque estático

$$M_e = \frac{d_3 \times F}{i \times 2000} = \frac{80 \times 100}{4 \times 2000} = 1\,\text{Nm}$$

c) Momento de Inércia Translacional

$$J_t = m_t \times \left(\frac{d_3}{2}\right)^2 \times 10^{-6} = 2 \times \left(\frac{80}{2}\right)^2 \times 10^{-6} = 0{,}0032\,\text{kg.m}^2$$

d) Momento de inércia rotacional (material:aço)

$$J_r = 7{,}7 \times d^4 \times 1 \times 10^{-13} = 7{,}7 \times 80^4 \times 50 \times 10^{-13} \times 2 = 0{,}00315\,\text{kg.m}^2$$

e) Momento de inércia reduzido

$$J = J_m + J_{red} + \left(\frac{J_t + J_r}{i^2}\right) = 0{,}00035 + 0{,}0012 + \left(\frac{0{,}0032 + 0{,}00315}{4^2}\right) = 0{,}00195\ \text{kg.m}^2$$

Fornecido:

Jm SMA-56-04-20 = 0,00035 kg.m^2
$J_{redutor}$ = 0,00120 kg.m^2

Então :

f) Torque dinâmico:

$$M_d = \frac{n_m \times J}{9{,}55 \times t_a} = \frac{1910 \times 0{,}00195}{9{,}55 \times 0{,}1} = 3{,}9 \text{ Nm}$$

g) Torque do motor

$$M_m = \left(\frac{M_e + M_d}{\eta}\right) = \left(\frac{1 + 3{,}9}{0{,}85}\right) = 5{,}76 \text{ Nm}$$

h) Especificação do servomotor:

SWA – 56 – 6,1 – 20
Servomotor CA - 6 Nm – 2000 rpm

i) Especificação do servoconversor:

SCA – 04 - 8/16
Servoconversor CA- corrente nominal 8 A
RF – 200, resistor de frenagem de 200W

j) Especificação do autotransformador (Para tensões de 380V e 440V)

Potência do servomotor : 1,25KW
Fórmula: 1,25 x Pot.servomotor = 1,25 x 1,25 = 1,56

Portanto: Autotransformador trifásico de tensão primária 380/440V e tensão secundária 220V, potência de 1,5 KVA.

2. Num torno CNC o carro longitudinal da ferramenta é deslocado por um fuso de esferas com velocidade máxima de 9 m/min e com rampa de aceleração de 0,2 s.

Sabendo-se :
Massa do carro: 70 Kg
Passo do fuso: 10 mm
Diâmetro do fuso: 25 mm
Comprimento do fuso: 1500 mm
Força de usinagem: 754 N
Relação de redução: 2:1
Rendimento do sistema: 85%
Inércia do redutor: 0,002 $Kg.m^2$
Rede de alimentação: 440V

Solução:

Rotação do servomotor:

$$n_m = \frac{\nu \times 6.10^4 \times i}{n} = \frac{0{,}15 \times 6.10^4 \times 2}{10} = 1800\,\text{rpm}$$

Torque estático:

$$M_e = \frac{h \times F}{i \times 2000 \times \pi} = \frac{10 \times 754}{2 \times 2000 \times \pi} = 0{,}16\,\text{Nm}$$

Momento de inércia rotacional

$$J_r = 7{,}7 \times d^4 \times 1 \times 10^{-13} = 7{,}7 \times (25)^4 \times 1500 \times 10^{-13} = 0{,}00045\,\text{Kg.m}^2$$

Momento de inércia translacional

$$J_t = m_t \times \left(\frac{h}{2.\pi}\right)^2 \times 10^{-6} = 70 \times \left(\frac{10}{2.\pi}\right)^2 \times 10^{-6} = 0{,}00018\,\text{Kg.m}^2$$

Momento de inércia reduzido

$$J = J_m + J_{red} + \left(\frac{J_t + J_r}{i^2}\right) \times 0{,}15 = 0{,}22 \times 10^{-3} + 0{,}002 + \left(\frac{0{,}00018 + 0{,}00045}{2^2}\right) = 0{,}002535\,\text{Kg.m}^2$$

Torque dinâmico

$$M_d = \frac{n_m \times J}{9{,}55 \times t_a} = \frac{1800 \times 0{,}002535}{9{,}55 \times 0{,}2} = 2{,}38\,\text{Nm}$$

Torque do motor

$$M_m = \frac{M_e + M_d}{\eta} = \frac{0{,}6 + 2{,}38}{0{,}85} = 3{,}5\,\text{Nm}$$

Portanto,

- SWA 56-3,8-20
- SCA 04-08/16
- Resistor RF-200
- Autotransformador: 1,25 x pot. Motor = 1,25 x 0,7 = 0,87 KVA

4.8 INSTALAÇÃO DO SERVOACIONAMENTO

4.8.1 *DESCRIÇÃO DO CONECTOR DE POTÊNCIA (X5)*

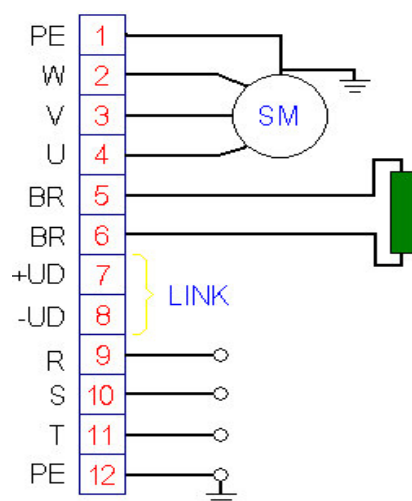



Figura 39 – Conector de potência X5.

Os terminais do link são utilizados para a ligação de servoconversores em paralelo, o qual deve ser dimensionado o número de *RF's* necessários.

4.8.2 *DESCRIÇÃO DO CONECTOR DE SINAIS (X1)*

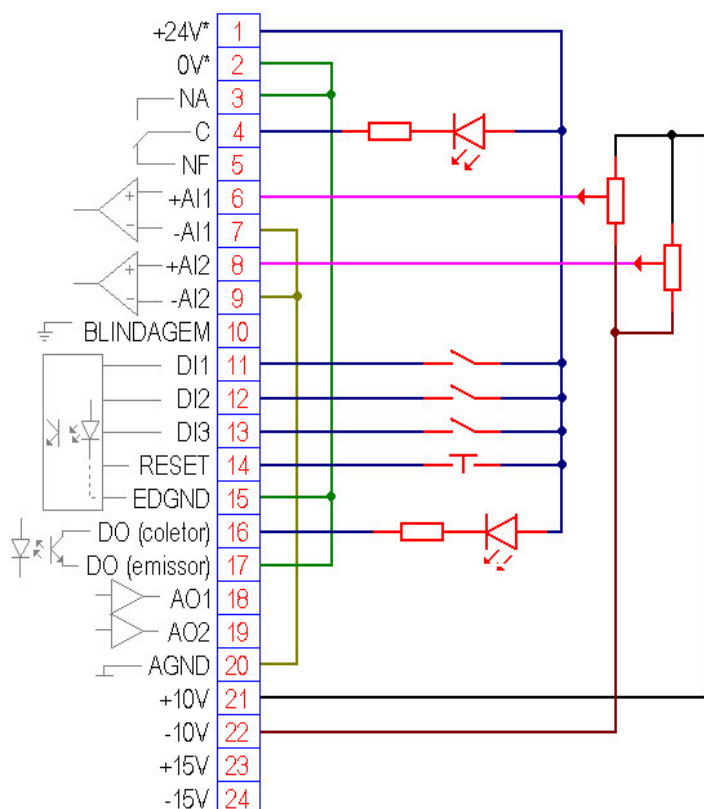



Figura 40 – Conector de sinais X1.

4.8.3 *DIAGRAMA DE BLOCO SIMPLIFICADO DO SERVOCONVERSOR*

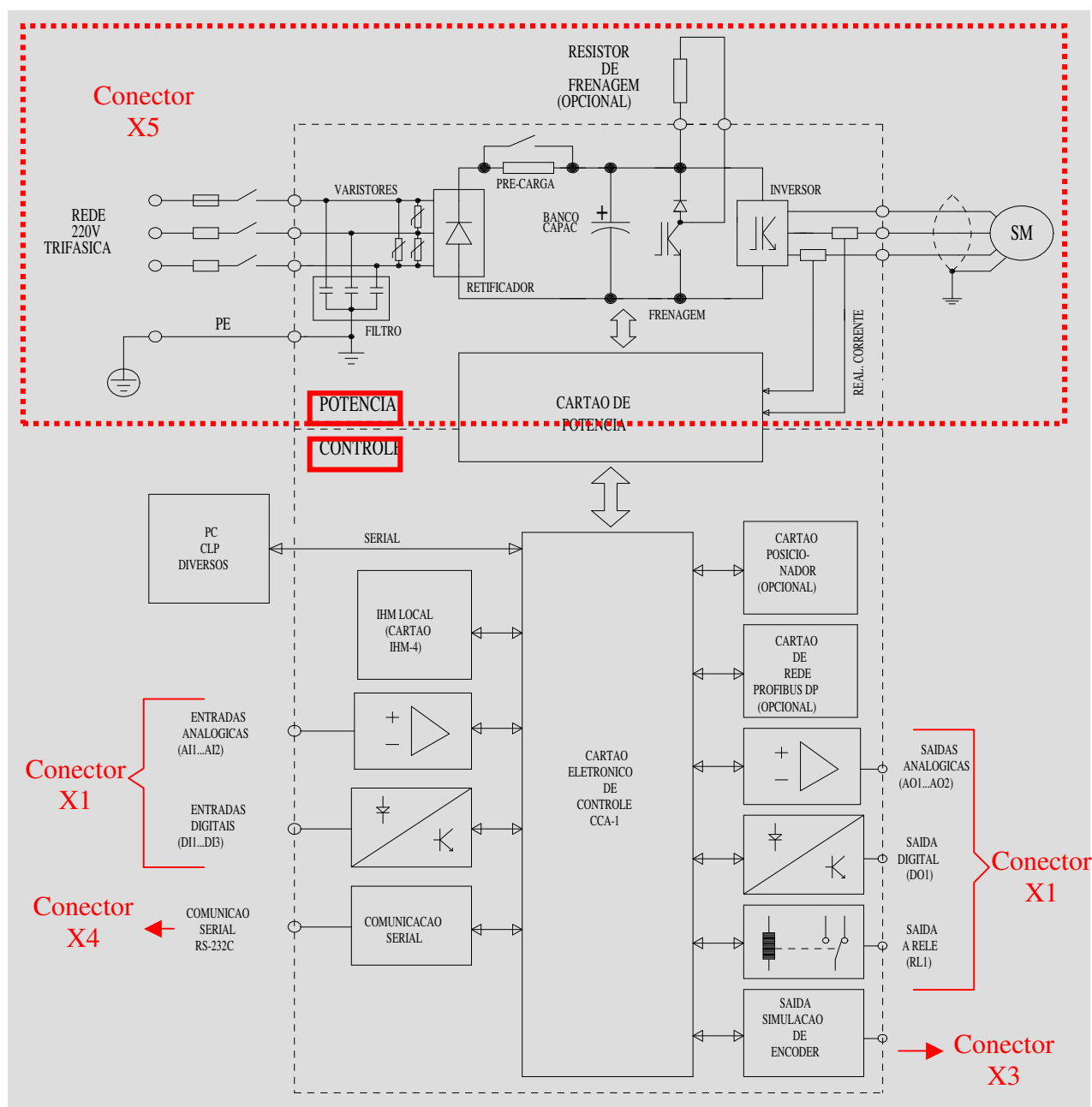



Figura 41 – Diagrama de bloco.

- No estágio de potência a tensão da rede é transformada em tensão contínua através do retificador, sendo então filtrada pelo banco de capacitores formando o circuito intermediário. A partir do circuito intermediário o inversor gera a alimentação trifásica para o motor com tensão e freqüência variáveis, utilizando a técnica de modulação *PWM* senoidal e técnicas de controle vetorial.
- Módulo de frenagem: é conectado externamente um resistor para dissipar a energia acumulada no circuito intermediário durante desacelerações, evitando sobretensão;

- Cartão de potência contém: retificador, pré-carga, banco de capacitores do circuito intermediário, inversor, filtro de rede (capacitores), proteção contra surtos (varistor), transistor de frenagem, drivers de comando isolados, leitura das correntes de saída, fontes para alimentação da eletrônica e dos drivers.
- *RS – 232:* é ponto a ponto, não é isolada galvanicamente do *0 V* da eletrônica do servoconversor e permite distâncias de até *10 m*. A taxa de transmissão máxima é *9600 bps* (bits por segundos);
- *RS – 485:* é permitida através de um módulo opcional externo, *MIW – 02* (conversor *RS – 232 / RS – 485).* Esta interface é isolada galvanicamente e permite distâncias de até *1200 m;*
- Frenagem reostática: é empregada na maioria das aplicações de servoconversores, onde se deseja tempos muito curto de desaceleração ou ainda no caso de cargas de elevada inércia. Durante a desaceleração a energia cinética é regenerada no link *DC* (circuito intermediário). Esta energia carrega os capacitores elevando a tensão. É possível instalar até *02* módulos *RF–200* em paralelo, no caso de cargas de elevada inércia ou instalação de servoconversores em paralelo. Em aplicações de baixa energia cinética é possível a utilização de apenas um módulo *RF-200*, para um grupo de *2* ou mais servoconversores.